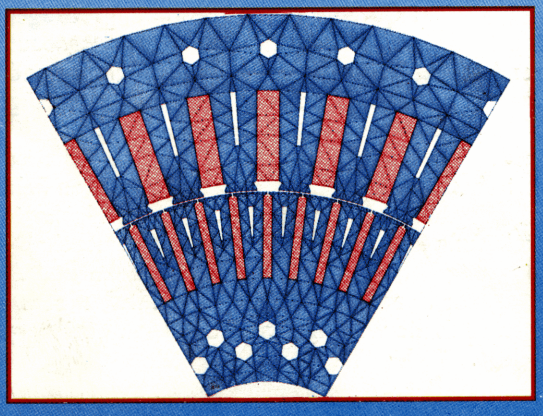
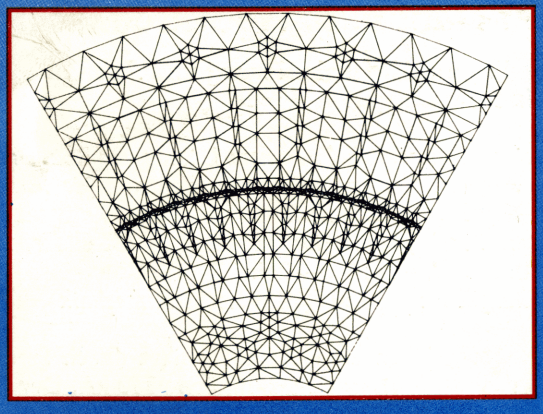
ELEKTRIE 12|89

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399

Programmsystem **Numerische Feldberechnung** zur allgemeinen Anwendung in der Industrie

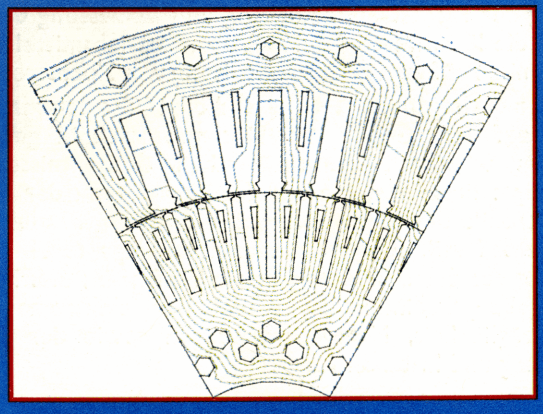


Analyse



Preprocessing

Processing



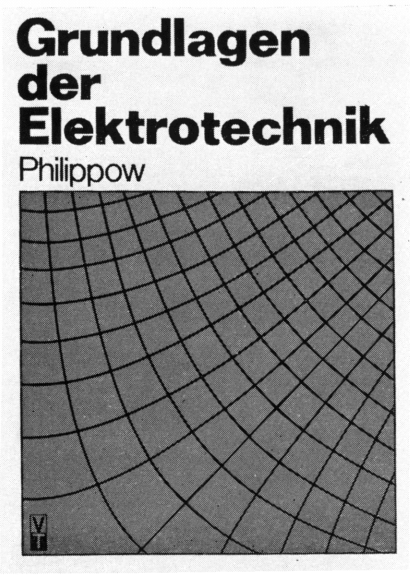
Postprocessing

Technische Universität Dresden

Sektion Elektrotechnik

0120230

IM FACHBUCHHANDEL ERHÄLTLICH



Grundlagen der Elektrotechnik

Von Prof. em. Dr. sc. techn. Dr. techn. h.c. Eugen Philippow. 8., bearbeitete Auflage. 784 Seiten, 674 Bilder, 11 Tafeln, Leinen, 51,— M; 64,— DM.
Bestellangaben: 553 897 1/Philippow. Elektrotechnik

Dieses Hochschullehrbuch führt in anschaulicher Weise in die Grundlagen und Berechnungsverfahren der theoretischen Elektrotechnik ein. Von dem abstrakten mathematischen Zusammenhang ausgehend, werden die Verfahren bis zur konkreten Berechnung geführt. Mit zahlreichen numerischen Verfahren der Feldberechnung und heute besonders aktuell gewordenen Verfahren (wie z. B. die Methode der finiten Elemente) geht das Buch speziell auf die Bedürfnisse des Ingenieurs ein. Gerade dieser anwendungsbezogene Aspekt wurde in der 8. Auflage noch stärker ausgebaut. Weiterführende numerische Verfahren, topologische und graphentheoretische Methoden tragen den modernen Möglichkeiten der Computertechnik Rechnung.
Nach der Theorie der Felder – dem elektrostatischen, dem elektrischen Strömungsfeld, dem magnetischen Feld und dem elektromagnetischen Feld – wird der Mechanismus der Stromleitung behandelt. Die Wechselstromtechnik sowie die Berechnung beliebiger linearer Netzwerke und Ausgleichsvorgänge in linearen Netzwerken schließen sich an. Dabei werden auch die wichtigsten Grundlagen der Vierpoltheorie dargelegt.

VEM-Handbuch Hochstromtechnik

Grundlagen, Dimensionierung und Ausführung von Hochstromanlagen

Von einem Autorenkollektiv unter Leitung von Doz. Dr. sc. techn. Gert Winkler. Herausgegeben vom Zentrum für Forschung und Technologie des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin. 2., stark bearbeitete Auflage. 516 Seiten, 335 Bilder, 144 Tafeln, Kunstleder, 43,— M; 60,— DM.
Bestellangaben: 553 720 7/VEM-Hochstromtechnik

Hochstromanlagen sind charakterisiert durch Stromstärken größer als 3 kA bis gegenwärtig etwa 350 kA. Der Inhalt des Buches umfaßt die theoretischen Grundlagen zur Berechnung der Hochstromfortleitung und Bemessung der Leitungen, die Kennwerte der Hochstrombetriebsmittel sowie die Technik, Prüfung und Instandhaltung von Hochstromanlagen.
In der vorliegenden Auflage sind die in den letzten zehn Jahren auf dem Gebiet der Hochstromtechnik gewonnenen neuen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse berücksichtigt: Probleme, die aus der Anwendung der Leistungselektronik und der Automatisierung der Produktionsprozesse auf mikroelektronischer Grundlage resultieren, und solche aus der Einführung neuer Verfahren; u.a. Fragen der Umgebungsbeeinflussungen und der elektromagnetischen Verträglichkeit, Netzrückwirkungen sowie der Inbetriebsetzung und Instandhaltung.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

12|89 ELEKTRIE

43. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013–5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Goldene Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Leistungsfähig, möglichst universell anwendbar und leicht nutzbar sind wesentliche Merkmale von Programmsystemen numerischer Feldberechnung als Werkzeug rechnergestützter Ingenieurarbeit bei der Entwicklung elektrotechnischer Erzeugnisse. Unser Bild weist auf wesentliche Arbeitsschritte hin. Analyse des physikalisch-technischen Problems und Wertung der Ergebnisse des Postprocessings erfordern intensive Ingenieurtätigkeit. Auf Programmsysteme und ihre Anwendung gehen die Beiträge auf den Seiten von 444 bis 452 und von 460 bis 464 ein.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Inhalt

Seite

Aktuelle Information 442

Kunze, W.

Numerische Feldberechnung Methoden — Programmsysteme — Anwendung 443

Fachaufsätze

Kunze, W.; Kuß, H.; Binner, A.; Hahn, M.

Finite Elemente Methode — ein modernes Berechnungswerkzeug des Ingenieurs 444

Puchner, G.; Lindner, M.; Roseburg, D.

Numerische Magnet- und Wärmefeldberechnungen in Großtransformatoren 450

Zoworka, G.

Berechnung der Bedarfskoeffizienten in Industriebetrieben 453

Franzke, H.; Geißler, E.; Krieger, D.

Teilentladungssonde robotron M 4202— technische Eigenschaften und Anwendungshinweise 455

Komeza, K.; Krusz, G.; Wiak, S.

Vergleich der Berechnung eines Transformators mit der MFE mit Elementen der 0. und höherer Ordnung 460

Thiem, E.

Programmpaket FELD 88 zur Berechnung magnetischer Felder mit leistungsfähigem Iterationsverfahren 462

Rayes, M. N.; Böhme, H.

Das Hochspannungs-Übertragungssystem Syriens unter dem Einfuß der Luftverschmutzung 465

Bauer, H.; Gnüchtel, K.; Leucke, O.; Schindler, J.

Realisierung von Diagnosemethoden mit Hilfe der Schaltanlagenleittechnik auf Mikrorechnerbasis 467

Kule, L.

Gleichrichtervergleich vom Standpunkt der Energieabnahme 473

Umschau

Tagungsbericht 474

Kurzberichte 474

Aus anderen Zeitschriften 475

Bücher 477

AKTUELLE INFORMATION

Angewandte numerische Magnetfeldberechnung

7. Internationale Wintertagung

Zeit: 7. bis 9. Februar 1990
Ort: Technische Universität Karl-Marx-Stadt

Veranstalter: Technische Universität Karl-Marx-Stadt, Sektion Automatisierungstechnik

Inhaltliche Schwerpunkte
- 2-D- und 3-D-Berechnung magnetischer Felder, zeitabhängige Magnetfeldprobleme.
- Leistungsfähigkeiten neuer Programmsysteme, deren Entwicklungsstand und Möglichkeiten
- Praktische Anwendungen der Magnetfeldberechnung bei der Entwicklung elektrotechnischer Erzeugnisse und der Simulation elektrischer Antriebe
- Numerische Techniken, Netzgenerierung, Fehlerabschätzung.

Anfragen
Technische Universität Karl-Marx-Stadt
Sektion Automatisierungstechnik
WB 14240
Dr.-Ing. *E. Thiem*
PSF 964
KarlMarx-Stadt, 9010
Tel.: 5613377 EK 4058

Galvanotechnik 1990

10. Internationale Fachtagung

Zeit: 9. bis 11. Mai 1990
Ort: Karl-Marx-Stadt (Stadthalle)

Veranstalter: Fachausschuß Galvanotechnik mit dem für das Prozeßgebiet Oberflächenbehandlung verantwortlichem Kombinat VEB Lokomotivbau Elektrotechnische Werke „Hans Beimler" Hennigsdorf gemeinsam mit dem Bezirksverband der Kammer der Technik Karl-Marx-Stadt

Die Fachtagung orientiert auf die Verbreitung neuer Erkenntnisse entsprechend des fortschreitenden wissenschaftlich-technischen Standes der Galvanotechnik im internationalen Maßstab.
Unter Beachtung der ökonomischen Strategie zur Rationalisierung der Produktionsprozesse und zum Energie- und Werkstoffrecycling werden die progressiven Entwicklungsrichtungen sichtbar gemacht.

Inhaltliche Schwerpunkte
- Komplexe Prozesse in der Galvanotechnik
  - Beschichtungsverfahren
  - Stoffkreisläufe, Werkstoffrecycling
  - Rechnergestützte Prozeßplanung und Prozeßrealisierung
- Galvanische Verfahren für die Mikroelektronik

Eine umfassende Posterreihe untersetzt die Fachtagung zu speziellen neuen galvanischen Prozessen.

Anfragen
Kammer der Technik
Bezirksverband Karl-Marx-Stadt
— Tagungsorganisation —
Annaberger Str. 24
Karl-Marx-Stadt
9001
Telefon 62141
Buschbeck, Karl-Marx-Stadt EK 4059

Im Rahmen der Wissenschaftlichen Tage 1990 der Technischen Universität „Otto von Guericke" Magdeburg finden folgende Veranstaltungen statt:

VI. Symposium „Zuverlässigkeit"

Zeit: 3. bis 5. September 1990
Ort: TU „Otto von Guericke" Magdeburg

Veranstalter: Arbeitsgruppe Zuverlässigkeit der Technischen Universität „Otto von Guericke" Magdeburg

Durch Vorträge und Diskussionen sollen Methoden der Zuverlässigkeitsarbeit und Beispiellösungen mit dem Ziel einer multivalenten Nutzung in vielen Bereichen der Volkswirtschaft dargelegt werden. Die Zuverlässigkeit der Erzeugnisse ist sowohl eine entscheidende Effektivitätsreserve unserer Volkswirtschaft als auch ein wichtiges Argument für den Verkauf der Produkte auf dem Weltmarkt. Die Erhöhung der Arbeitsproduktivität, die Senkung des Material-, Energie- und Arbeitskräftebedarfs werden durch die Zuverlässigkeit der Erzeugnisse wesentlich beeinflußt.
Das Symposium vermittelt Erfahrungen aus der Zuverlässigkeitsarbeit in den verschiedenen Phasen des Reproduktionsprozesses und verdeutlicht die Wechselwirkung zwischen Theorie und Praxis.

Inhaltliche Schwerpunkte
- Bewertung der Zuverlässigkeit von Erzeugnissen
- Strategien, Methoden und Arbeitsmittel der Zuverlässigkeit
- Leitung, Planung und Organisation der Zuverlässigkeitsarbeit
- Modellierung und Beeinflussung von Schädigungsprozessen
- Technische Diagnostik, Schadensbekämpfung und Instandhaltung
- Rechnergestützte Methoden der Zuverlässigkeitsarbeit.

Anfragen
Technische Universität
„Otto von Guericke" Magdeburg
Tagungsbüro
Postschließfach 124
Magdeburg
3010

Gestaltung von Fertigungsprozessen im Maschinenbau

4. Fachtagung

Zeit: 5. und 6. September 1990
Ort: TU „Otto von Guericke" Magdeburg

Veranstalter: Sektion Technologie der metallverarbeitenden Industrie, Wissenschaftsbereich Fertigungsgestaltung

Durch Vorträge und Fachgespräche sollen Möglichkeiten, Methoden, Voraussetzungen und verallgemeinerungswürdige Erfahrungen bei der Entwicklung und Anwendung neuer und weiterentwickelter Fertigungsverfahren und Fertigungsprozesse sowie bei der Automatisierung der Ingenieurarbeit im Maschinenbau aufgezeigt werden. Auf der Fachtagung werden Forschungsergebnisse und Anwenderlösungen zu neuen und weiterentwickelten Fertigungsverfahren, zu Grundlagen der Gestaltung flexibler automatisierter rechnerintegrierter Fertigungen, zu weiterentwickelten Fertigungsverfahren und Fertigungsprozessen sowie zur Automatisierung der Verfahrens-, der Prozeßführung und der Ingenieurarbeit im Maschinenbau vorgestellt.
Folgende Schwerpunkte stehen auf dem Programm:
- Konstruktiv-technologisch günstige Gestaltung und rationelle Herstellung von dem Endzustand weitgehend angenäherten Ausgangsteilen für die Teilefertigung
- Neuartige fertigungsverfahrenstechnische Lösungen der Urform-, Umform-, Zerteil- und Abtrenntechnik für die mechanische Fertigung von Einzelteilen
- Rechnergestützte technologische Fertigungsvorbereitung im Hinblick auf die flexible automatisierte rechnerintegrierte Produktion (CIM), schwerpunktmäßig für prismatische und rotationssymmetrische Einzelteile unter Berücksichtigung des Einsatzes von NC-Fertigungsmitteln und flexiblen automatisierten Fertigungssystemen (CAP)
- Methoden für die rechnergestützte Gruppentechnik
- Effektiver Werkzeugeinsatz und rationelle Werkzeugwirtschaft.

Anfragen
Technische Universität
„Otto von Guericke" Magdeburg
Tagungsbüro
Postschließfach 124
Magdeburg
3010

Fertigung und Gütesicherung im Zahnradgetriebebau

8. Vortragstagung mit internationaler Beteiligung

Zeit: 12. und 13. September 1990
Ort: TU „Otto von Guericke" Magdeburg

Veranstalter: Wissenschaftsbereich Qualitätssicherung und Fertigungsmeßtechnik der Sektion Technologie der metallverarbeitenden Industrie und VEB Kombinat Getriebe und Kupplungen Magdeburg

Inhaltliche Schwerpunkte
- Qualitätsvorschriften, nationale und internationale Standardisierung
- Entwicklungstendenzen und Rationalisierungslösungen der Fertigung und Gütesicherung auf dem Weg zum CIM-Betrieb
- Rechnergestützte statistische Qualitätssicherung und Fertigungsmeßtechnik
- Entwicklung von Verfahren und Fertigungsmitteln in der Verzahnungstechnik
- Rechnergestützte technische Fertigungsvorbereitung und Fertigungsprozeßsteuerung
- Qualitätssicherungslösungen für Fertigungsbereiche verschiedener Automatisierungsstufen, CAQ-Systeme und CAQ-Moduln
- Entwicklungstendenzen von Programm- und Gerätelösungen der 3-Koordinatenmessung im Zahnradgetriebebau.

Anfragen
Technische Universität
„Otto von Guericke" Magdeburg
Tagungsbüro
Postschließfach 124
Magdeburg
3010
Die Redaktion EK 4072

Numerische Feldberechnung Methoden – Programmsysteme – Anwendung

Von

Doz. Dr. sc. techn. Werner Kunze

Technische Universität Dresden
Sektion Elektrotechnik

Die im Wechsel von der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt (TUK), Sektion Automatisierungstechnik und der Technischen Universität Dresden (TUD), Sektion Elektrotechnik veranstalteten Wintertagungen „Angewandte numerische Magnetfeldberechnung" verfolgen vielseitige Ziele zur Programmentwicklung und Anwendung numerischer Feldberechnung. Die 6. Tagung fand im Februar 1989 an der TUD als Weiterbildungsveranstaltung für Mitarbeiter aus unterschiedlichen Kombinaten, Instituten und Hochschulen statt, wobei das wissenschaftliche Niveau durch die aktive Teilnahme von Programmentwicklern aus Hochschulen, Akademieeinrichtungen und Forschungsinstituten der DDR, der UdSSR, der ČSSR und der VRP wesentlich erhöht wurde.

Die rasche und umfangreiche Entwicklung von Verfahren und Algorithmen zur numerischen Feldberechnung mit einer Vielzahl von Lösungsvarianten, die aber häufig nur für komplexere Forschungsaufgaben zweckgebunden entwickelt werden, erfordert, in regelmäßigen Zeitabständen Bilanz zu ziehen und Verfahren herauszustellen, die das Niveau allgemeiner Anwendung erreicht haben. Gleichzeitig ist den Methoden- und Programmentwicklern Gelegenheit für Kontakte und Anknüpfung gemeinsamer Programmentwicklung zu bieten, um Entwicklungskapazitäten gezielter einzusetzen. Hauptanliegen der Wintertagung als Weiterbildungsveranstaltung ist aber die praxisnahe Information der Forschungsmitarbeiter und Ingenieure über die Leistungsfähigkeit neuentwickelter Lösungsmodule und über den Leistungszuwachs von Programmsystemen bei Problemlösungen unterschiedlicher elektrotechnischer Erzeugnisse und Anordnungen sowie über ihren Beitrag zur Rationalisierung der Ingenieurarbeit und zur Verkürzung der Entwicklungszeiten. Praxisreife Programmsysteme, z. B. das XFEL der TUD, werden zur Nachnutzung angeboten.

Da sich vor allem mit der Methode der finiten Elemente (FEM) und der Boundary-Element-Methode (BEM) numerische Verfahren in elektromagnetischen (einschließlich elektrostatischen), thermischen, mechanischen Feldern u. a. physikalischen Feldern abgegrenzte Anwendungsbereiche erobert haben, nimmt die Tagung immer mehr interdisziplinären Charakter an.

Besonderer Wert wurde auf das Vorstellen gesicherter Verfahren numerischer Feldberechnung und auf das Abgrenzen ihrer Anwendungsbereiche gelegt. Darüber hinaus wurde aber auch der Trend neuer mathematischer Lösungsverfahren sowie die Problemanalyse und die Lösung unterschiedlicher Feldprobleme sichtbar gemacht. Die umfangreiche Zielstellung und das ansprechende Niveau, auch für regelmäßige Teilnehmer, konnte einerseits durch Nutzung des Einführungsvortrags und des Schlußworts als Orientierung für Erstanwender mit der Darlegung der Entwicklung numerischer Feldberechnung als CAD-Element, der Auswahl der Verfahren für die Einsatzbereiche, Posterpräsentation, Literaturzusammenstellung, und andererseits durch Vorträge über Softwareentwicklung von Mathematikern, Physikern und Elektrotechnikern über die Weiterentwicklung der Methoden und Lösungsverfahren sowie über unmittelbare Anwendung zur Lösung von Entwicklungsproblemen erfüllt werden. Besonderer Schwerpunkt waren die Einschätzung von Leistungsfähigkeit und Grenzen von Diskretisierungsverfahren — FEM einschließlich Multigridverfahren — und Integralgleichungsverfahren — BEM, CSM (charge simulation method), bzw. SCSM (surface charge simulation method), MMP (Methode multipler Multipole) sowie einige Grundsätze zur Kopplung von CSM und FEM bzw. BEM — FEM.

Als günstig erwies sich die Behandlung sehr unterschiedlicher Problemkreise und Erzeugnisse sowie die Einbeziehung stationärer und nichtstationärer Temperaturfeldberechnung mit entsprechenden Lösungsmodulen, in den FEM-Programmsystemen der TUD, des Akademieinstituts in Prag (ČSAV) und des VUES Brno. Die Vorstellung des Universellen Finite Element Programmsystems COSAR für mechanische und thermische 2- und 3D-Felder, mit Hinweisen zu exakten Datenschnittstellen bereicherte die Tagung wesentlich. Von den Integralgleichungsmethoden kristallisierte sich die BEM für offene Feldprobleme sowie die CSM bzw. die SCSM für elektrostatische Feldprobleme heraus. Bei elektromagnetischen Feldproblemen wird die BEM für Luftbereiche in elektrotechnischen Erzeugnissen (z. B. Wickelkopfraum von Turbogeneratoren) z. T. anstelle der FEM gesetzt. Erste Anwendungsbeispiele zur Kopplung von CSM und FEM sind bekannt. Zur Kopplung von BEM und FEM laufen intensive aber noch wenig praxiswirksame Untersuchungen.

Nach voller Beherrschung stationärer Feldberechnungen wurde intensiv an quasistationären Feldproblemen gearbeitet, wobei derzeit komplexere Untersuchungen an Erzeugnissen mit Spannungs- und Stromeinspeisung in den Vordergrund rücken.

Geeignete Speicherroutinen und schnellere Lösungsverfahren ermöglichen zunehmend die Nutzung von PC und AC, während Großrechner für sehr umfangreiche Feldprobleme aufgerufen werden, Pre- und Postprocessing meist aber den AC zugeordnet bleiben. Im Zusammenhang mit einem automatischen 3D-Netzgenerator des VUES Brno wurde die Problematik von 3D-Feldberechnungen diskutiert. Auf diesem Gebiet werden effektivere Lösungsverfahren gesucht und erprobt. Die Problemaufbereitung muß hier noch theoretisch durchdrungen werden und der Software- und Rechenaufwand steigt beträchtlich, so daß interdisziplinäre Zusammenarbeit auch über die Ländergrenzen erforderlich wird.

Nachfolgend werden einige Veröffentlichungen der TUD und der TUK sowie ausländischer Referenten vorgelegt, die aus Vorträgen der Wintertagung als kleiner Ausschnitt aus der Vielfalt der Problematik entstanden sind.

Die Tagungen werden mit der 7. Wintertagung vom 7. bis 9. Februar 1990 an der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt fortgesetzt. EK 4045

Finite-Elemente-Methode – ein modernes Berechnungswerkzeug des Ingenieurs

W. Kunze, KDT; H. Kuß, KDT; A. Binner, KDT; M. Hahn, KDT; Dresden

1. Methodenwahl

Die stürmische Entwicklung von Algorithmen zur numerischen Berechnung unterschiedlicher physikalischer Felder in elektrotechnischen Erzeugnissen und Einrichtungen und ihre rechentechnische Umsetzung wurden sowohl durch die Forderung nach leistungsfähigeren Verfahren für die Entwicklungs- und Berechnungspraxis als auch durch die außerordentlich schnelle Entwicklung der Rechentechnik verursacht. Neben der Erhöhung von Speicherkapazität und Rechengeschwindigkeit führte vor allem die Einführung leistungsfähiger PC und Workstations mit umfangreichen Grafikkomponenten zur Umgestaltung der Produktionsvorbereitung und zur Forderung nach Einbindung leistungsfähiger Programmsysteme zur Feldberechnung in entstehende CAD-Systeme. Durch eine weitgefächerte Methodenentwicklung für numerische Feldberechnung wurden umfangreichere und tiefergehende Problemstellungen lösbar, aber gleichzeitig auch hoher Bearbeitungsaufwand notwendig. Auf Grund der Forderung nach nutzerfreundlichen, durch Wahl unterschiedlicher Lösungsmodulen möglichst universell anwendbaren Programmsystemen, kristallisierten sich den Feldproblemen zugeordnete Algorithmen heraus (Bild 1), wobei die Entwicklung besonders für 3 D-Feldberechnungen noch nicht abgeschlossen ist.

Obwohl die Methode finiter Differenzen bei Herstellern von Erzeugnissen mit regelmäßiger Radialstruktur (z.B. bei Drehstrommaschinen) zu finden ist, hat sich weitgehend die Methode finiter Elemente (FEM) durchgesetzt, vor allem auch durch ihre nahezu ausschließliche Anwendung in Wärmetechnik und Mechanik. Bei den Integralgleichungsmethoden (IGM), deren Anwendungsbereich großräumige und vor allem lineare Feldprobleme sind, setzt sich immer mehr die Boundary-Element-Methode durch. Hauptsächlich für die Hochspannungs- und Isoliertechnik wurden davon ausgehend die Charge-Simulation-Methode (CSM) und die Surface-Charge-Simulations-Methode (SCSM) entwickelt. An die Stelle der hier eingeführten Ersatzladungen, die für Elektrotechniker sehr anschaulich sind, treten bei der Multiplen-Multipole-Methode mathematische Funktionen (Multiple Multipole) [1].

Um die Vorteile der Verfahren bei komplexeren Problemen besser nutzen zu können, werden Untersuchungen zur Kopplung der Methoden durchgeführt. In der Berechnungspraxis sind aber noch wenig praktikable Programmsysteme zu finden; ein Beispiel ist die Kopplung von CSM und FEM, wobei letztere zur exakten Berechnung des elektrodennahen Raumes eingesetzt wird [2].

Die Vorteile der FEM, auf die nachfolgend ausschließlich eingegangen wird, können erst in einem Programmsystem mit effektiven Preprocessing zur Datengenerierung, schnellen Lösungsverfahren für nichtlineare Gleichungssysteme und mit einem anwendungsorientierten Postprocessing voll wirksam werden. Derartige, gut strukturierte FEM Programmsysteme lassen sich als CAD-Element in Entwicklungsprozessen bei der optimierten Gestaltung der Erzeugnisse nutzen und leisten einen Beitrag zur Verbesserung und Verkürzung der Produktionsvorbereitung. Ihre Anwendung ist hier unter Nutzung von Datenbanken für Daten- und Ergebnissätze sowohl in der Vorlaufforschung und Grundlagenentwicklung, in der Weiterentwicklung hochausgenutzter Erzeugnisse mit verbesserten Qualitätsparametern als auch bei der Untersuchung konstruktiv-technologischer Probleme notwendig ([3], Bild 3).

Die Anwendung eines solchen Programmsystems setzt aber eine exakte Problemanalyse durch den Ingenieur voraus [4]. Das kann durch komfortable Nutzeroberflächen, wie sie gegenwärtig auch als Beratungssysteme erarbeitet werden, unterstützt werden. Sie führen den Anwender zu richtiger und den vorhandenen Lösungsmodulen angepaßter Problemaufbereitung [5].

2. Programmsystem XFEL

Der modulare Aufbau des FEM Programmsystems XFEL ermöglicht die Anpassung an Hardware mit unterschiedlichen Leistungsparametern und vor allem mit Niveauunterschieden in der Grafikkomponente.

Das erfordert auch unterschiedliche Formen des Preprocessing [3]. Bei der Generierung eines Datensatzes für einen FEM-Prozessor sind umfangreiche Datenmengen zu bearbeiten, so daß ein effektiv arbeitender Preprozessor den Zeitaufwand für den Anwender gering halten muß. Der Zugriff zur numerischen Feldberechnung entscheidet sich für viele Nutzer deshalb auch am Preprocessing. Auf einen der interaktiven Netzgeneratoren wird nachfolgend eingegangen. Bild 2 zeigt die wesentlichen Parameter des Programmsystems XFEL. Der Prozessor enthält unterschiedliche Lösungsmodule für das algebraische Gleichungssystem, abhängig davon, ob bei quasistationären Vorgängen komplexer Vektorpotentialansatz oder ein Zeitschrittverfahren mit linearer zeitlicher Diskretisierung angewendet wird. Auf Untersuchungen zur sicheren Berechnung des quasistatoinären Magnetfelds wird im Abschn. 4. eingegangen.

Durch Wahl geeigneter Lösungsalgorithmen konnte der Zeitaufwand für die Vektorpotentialberechnung wesentlich gesenkt werden. Als direktes Lösungsverfahren wurde die Gauß-Elimination und von den iterativen Verfahren das CG-Verfahren — besonders für Gitterpunktzahlen > 1000 — als praktikabel gefunden, die problemangepaßt aufgerufen werden können.

Unter der Voraussetzung, daß die Magnetisierungskennlinien im Berechnungsbereich ohne Wendepunkte verlaufen, ist das Newton-Raphson-Verfahren zur Berücksichtigung der Nichtlinearität am besten geeignet. Anderenfalls ist das Unterrelationsverfahren mit problemabhängigem Relaxationsparameter und wesentlich höherer Rechenzeit einzusetzen.

Das Postprocessing mit einer allgemeinen und einer problemspezifischen Auswertung ist für weiterführende Berechnungsschritte besonders wichtig. In der allgemeinen ersten Stufe der Auswertung der Feldberechnung werden die Feldgrößen und das Feldbild ermittelt. Die problemspezifische Auswertung umfaßt die Berechnung von Summen- bzw. Integrationsgrößen, wie Kräfte, Drehmomente, Induktivitäten. Durch geeignete Schnittstellen kann die Auswertung für spezielle Anwendungsfälle erweitert werden. Auf Probleme der Auswertung wird im Abschn. 5. eingegangen.

Das Programmpaket XFEL mit seiner Implementierung auf unterschiedlicher Hardware und nutzerfreundlichen Pre- und Postprocessing ermöglicht die Berechnung umfangreicher zweidimensionaler stationärer und quasistationärer auch stark nichtlinerer elektromagnetischer und Temperaturfeldprobleme in unterschiedlichsten elektrotechnischen Erzeugnissen, was durch zahlreiche Anwendungen auch im Industriebereich nachgewiesen werden konnte.

3. Interaktiver Netzgenerator

Von den unterschiedlichen Methoden zur Generierung des Datensatzes für die numerische Feldberechnung nach Bild 3 ist die manuelle Aufbereitung trotz hoher Flexibilität des Aufwands wegen nur bei kleinen Gitternetzen vertretbar. Die mechanisierte Gitternetzgenerierung verringert zwar den Aufwand, erfordert aber eine maßstabsgerechte Gitterzeichnung und Routinen für die Korrektur von Zeichnungsungenauigkeiten. Automatische Gitternetzgeneratoren sind wegen der sehr geringen Zahl von Eingabedaten und sehr schneller Gittererzeugung für oft zu berechnende typische Erzeugnisquerschnitte vorteilhaft. Nachteilig sind geringe Flexibilität und hoher Softwareaufwand für neue Strukturen und Teilelemente.

Neben Preprocessoren für mechanisierte und automatische Gitternetzgenerierung sind im Programmsystem XFEL auch interaktive Gitternetzgeneratoren eingesetzt ([3], Bild 5). Hinsichtlich Flexibilität und Softwareaufwand sind sie zwischen mechanisierter und automatisierter Netzgenerierung einzuordnen und lassen sich CAD-Systemen gut anpassen.

Der interaktive Netzgenerator „Grafik 89" für das Grafiksystem des AKT/S wurde entwickelt, um alle technisch sinnvollen Feldgebiete auch mit kompliziert verlaufenden Konturen zu vernetzen und rechenfähige Datensätze zu erzeugen. Anforderungen waren:

— Vernetzung ohne maßstäbliche Zeichnung nur bei Vorliegen einer Maßskizze

Dr. sc. techn. *Werner Kunze* ist Hochschuldozent; Dr. sc. techn. *Hans Kuß* ist wissenschaftlicher Assistent an der Technischen Universität Dresden; Dr.-Ing. *Andreas Binner* ist Entwicklungsingenieur im ZFW der AdW

Methode	Diskretisierungsart	Lösungsansatz	Anwendungsbereiche		
Diskretisierungsverfahren	Gesamtgebiet regelmäßig	Ersatz DGL (JGL) durch Differenzengleichung	abgegrenzte Feldgebiete (starker Randeinfluß)		
FDM			Rechteck-Radialstruktur	Magnet-Wärmefelder	auch stark nichtlinear
FEM	Gesamtgebiet unregelmäßig	Variationsansatz Energieminimierung in Elementen	beliebige Strukturen	physikalische Wirbel- und Potentialfelder	
Volumen-JGL	Diskretisierung nur der Stromgebiete	numerische Lösung des Poissonschen Integral	(abgegrenzte) offene Feldgebiete (schwacher Randeinfluß)		
			Einstoff-Feldgebiete		
Randintegralgleichungen	Diskretisierung einer Rand-(Grenz-)Linie	JGL für Potentialverteilung auf Rand Potentialberechnung im Gebiet	Einstoffgebiete	Skalarpotentialfelder	konstante Materialeigenschaften
BEM			eng begrenzte Mehrstoffgebiete		
CSM	Diskretisierung einer Rand-(Elektroden)Linie evtl. mit gegebenem Potentialverlauf	fiktive Ersatzladungen im Gebiet an Oberfläche	Einstoff- und Mehrstoffgebiete	elektrostatische Felder	konstante Materialparameter (evtl. gebietsweise)
SCSM					
MMP	Diskretisierung von Rand-(Grenz-)Linien	fiktive Magnetpole (multiple Multipole) im Gebiet	Mehrstoffgebiete	magnetostatische und stationäre Magnetfelder	konstante sehr begrenzt feldabhängige Permeabilität

Bild 1. Methoden numerischer Feldberechnung

— Vernetzung bis zur sinnvollen Erfassung der Kontur unter Beachtung der Seitenverhältnisse der Dreieckelemente

— Ausnutzung vorhandener Symmetrien, interaktive Zuordnung der Randbedingungen

— Fehlertestung des Datensatzes

— automatisches Ordnen der Daten entsprechend der Syntax des Datensatzes

— einfaches Editieren vorhandener Datensätze.

Der modulare Aufbau (Bild 4) ermöglicht den Eintritt in das Programmsystem je nach Aufgabenstellung und die Überprüfung auf Fehler nach jedem Bearbeitungsschritt.

Das Erstellen eines Datensatzes für ein Feldgebiet beginnt mit der Erarbeitung einer Eingabedatei für Konturen und mögliche Stützstellen. Unter möglicher Ausnutzung mehrfacher Symmetrien sind nur wenige Eingabezeilen notwendig. Aus diesen Daten wird ein Grundraster berechnet und auf den Bildschirm gezeichnet. Mit dem Grafiktableau kann nun interaktiv das Gitternetz eingezeichnet werden. Anschließend werden die Fehler durch ungenaues Anpicken des Grundrasters und durch ungenügende Auflösung von Schirm und Tableau automatisch eliminiert. Ein Prüfprogramm findet Fehler im Datensatz und gibt Informationen zur Fehlerbeseitigung.

Treten Fehler nicht mehr auf, kann geordnet oder die Elementzahl vervierfacht werden. Sind periodische Randbedingungen nur auf einer Grenz-, z. B. Durchmesserlinie, und das Vektorpotential Null auf den übrigen Randlinien zu erfüllen, z. B. bei der Polteilung einer elektrischen Maschine, so wird automatisch geordnet. In allen anderen Fällen werden die Randbedingungen interaktiv den Randknotenpunkten zugeordnet und anschließend geordnet. Sollten Änderungen an einem vorhandenen Datensatz vorgenommen werden, ist der Datensatz zu editieren und nur eine Eingabedatei für die zu ändernden Untergebiete zu erstellen, da das Grundraster des unveränderten Feldgebietes automatisch berechnet wird. Diese Möglichkeit des Editierens von Datensätzen ist besonders dann interessant, wenn geringe Änderungen an der Geometrie, z. B. zusätzliche Kühlkanäle, veränderte Nutschlitzbreiten, veränderte Luftschlitze o. ä., zu untersuchen sind.

Nach Abschluß der interaktiven Arbeit kann, unabhängig von Kontursymmetrien die Anzahl der Elemente des Datensatzes — auch mehrmals — vervierfacht werden, wobei nur darauf zu achten ist, daß die Anzahl der Elemente vom Hauptspeicher im Rechenprogramm verarbeitet werden kann. Durch das Vervierfachungskonzept ist eine Vergrößerung der Seitenverhältnisse der Dreieckselemente ausgeschlossen.

Der interaktive Netzgenerator „Grafik 89" hat sich bei der Generierung vieler Datensätze sowohl für einfache Konturen, z. B. von Asynchronmaschinen als auch für komplizierte Geometrien, z. B. Gleichstrom-, Synchronmaschinen, Uhrenschrittmotoren, bewährt.

Preprocessing	Netz- und Datengenerierung - mechanisierter Netzgenerator mit Digitalisiergerät HGD - automatischer Netzgenerator - interaktiver Netzgenerator		
Processing			
Methode	FEM		
Dimension	2		
Feldarten	statische, stationäre, quasistationäre Magnetfelder; Temperaturfelder		
Anregung	beliebige Strom-Dauermagnet- und Verlustverteilung		
Stoffkennwerte	$\nu(B)$, $\lambda(T)$, ρ isotrop; ideale Anisotropie		
Koordinatensystem	kartesisch, polar		
Element	Dreieck 1. Ordnung		
EDVA	16 bit PC	EC 1056	32 bit Workstation
Knotenzahl	≤ 1500	≤ 4500	abhängig von EDVA
Elementzahl	≤ 3000	≤ 9000	abhängig von EDVA
Sprache	FORTRAN		
Lösungsverfahren wahlweise	direkt (modifiziertes Gaussverfahren) iterativ (CG-Verfahren) in Verbindung mit dem Newton-Raphson-Verfahren		
Postprocessing			
Ausgabe	Bildschirm, Datei, Plotter, Drucker		
Auswertung	- Kontur, Gitter, Feldbild, Funktionsverläufe - physikalische Größen (B, ϕ, ψ, F, M) - Parameter (R, L, k_C, α)		

Bild 2. Programmsystem XFEL

Den Zeitaufwand bestimmen hierbei nicht die Zahl der Elemente, sondern die komplizierten geometrischen und Materialkonturen und damit das Erstellen der Eingabedaten.

Mit dem „Grafik 89" steht ein sehr leistungsfähiges Programmsystem zur Verfügung, das bei entsprechender Grafikhardware und -software ein wirkungsvolles Instrument für Anwender der numerischen Feldberechnung ist. Menüsteuerung und ausführliche Dokumentation sichern eine rasche Einarbeitung der Anwender.

Methode	Kurzcharakteristik	Vorteile	Nachteile
Manuelle Datengenerierung	- Berechnung der Knotenpunktkoordinaten von Hand - Zuweisung der Elemente, Materialart, Steuerzeichen von Hand	- keine Hardware- und Softwarevoraussetzung - hohe Flexibilität	- hoher Zeitaufwand - hohe Fehlerwahrscheinlichkeit
Mechanische Datengenerierung	- Erstellung des Datensatzes mit maßstäblicher Zeichnung und Digitalisiergerät	- hohe Flexibilität - leichte Handhabbarkeit	- Auflösung (relativ gering) durch Zeichengenauigkeit begrenzt - maßstäbliche Zeichnung und Digitalisiergerät erforderlich - Fehlerkorrekturroutinen notwendig
Automatische Datengenerierung	- Beschreibung der Geometrie mit Eingabedaten - Automatische Erstellung des Datensatzes	- sehr geringer Aufwand für die Dateneingabe - geringer Zeitaufwand für die Datensatzgenerierung - Macronutzung	- geringe Flexibilität - hoher Softwareaufwand - Vernetzungsdichte softwareabhängig
Interaktive Datengenerierung	- Beschreibung der Geometrie mit Eingabedaten - Zeichnung des Gitternetzes interaktiv mit Schirm und Tableau	- hohe Flexibilität - geringer Softwareaufwand als bei automatischer Generierung - Macronutzung	- leistungsfähiges Grafiksystem erforderlich - Aufwand zur Datensatzgenerierung höher als bei automatischer Generierung

Bild 3. Methoden der Datengenerierung

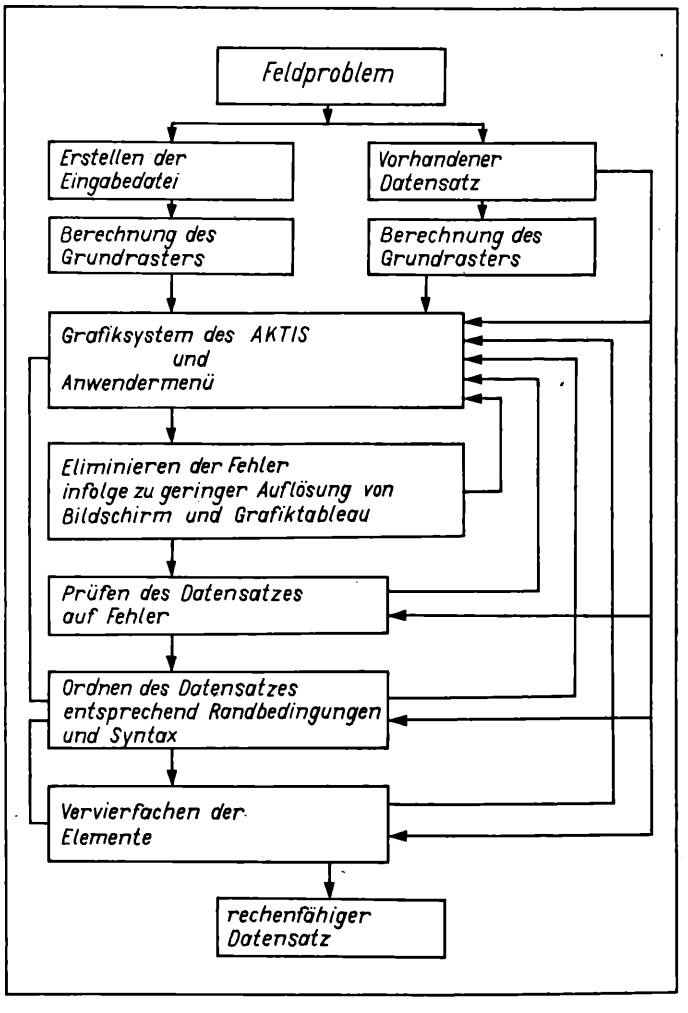


Bild 4. Modularer Aufbau des Gitternetzgenerators

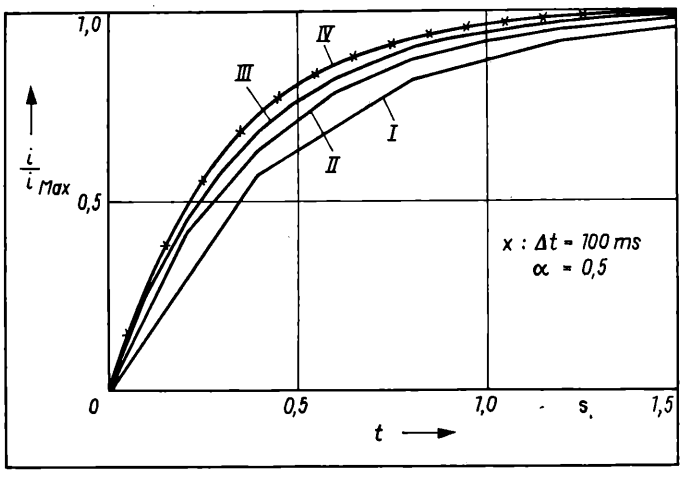


Bild 5. Zeitlicher Verlauf des Systemstromes einer Drosselspule nach Einschalten einer Gleichspannung
I: $\Delta t = 400$ ms
II: $\Delta t = 200$ ms
III: $\Delta t = 100$ ms $\alpha = 1{,}0$
IV: $\Delta t = 10$ ms
x: $\Delta t = 100$ ms, $\alpha = 0{,}5$

4. Quasistationäre Feldberechnung

Bei Berücksichtigung zeitlich veränderlicher magnetischer Felder bilden sich die elektrische Feldstärke und damit die Stromdichte aus den Komponenten

$$\vec{G} = \varkappa \vec{E} = \vec{G}_e + \vec{G}_0 - \varkappa \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}. \tag{1}$$

Die wirbelfreien Anteile $\vec{G}_e$ und $\vec{G}_0$ resultieren aus den Parametern der elektrischen Speisung bzw. dienen der Berücksichtigung elektrischer Zusatzbedingungen. Der durch zeitliche Änderung des Magnetfeldes entstehende Wirbelanteil enthält sowohl die sich innerhalb eines Leiters schließenden Wirbelströme als auch die durch Gegeninduktionsspannung hervorgerufene Stromkomponente, die als „Wirbelstrom" mit Rückschluß über die Quelle interpretiert werden kann.

Die Anwendung der FEM ergibt ein Gleichungssystem der Form

$$[K]\{A\} + [T]\frac{\partial(\{A\} + \{A_0\})}{\partial t} = \{I_e\}. \tag{2}$$

Um die Gleichartigkeit der unbekannten Größen zu erreichen, wurde mit

$$G_0 = -\varkappa \frac{\partial A_0}{\partial t} \tag{3}$$

die Zusatzstromdichte durch Zusatzpotentiale ersetzt. Für beliebige Formen der Zeitabhängigkeit läßt sich (2) durch Anwendung eines Zeitschrittverfahrens — hier mit linearer zeitlicher Diskretisierung — in das algebraische Gleichungssystem

$$[K]^*_{i+1}\{A\}_{i+1} + [T](\{A\}_{i+1} + \{A_0\}_{i+1}) = \{I\}^*_i \tag{4}$$

mit

$$[K]^*_{i+1} = \Delta t\, \alpha\, [K]_{i+1}$$

und

$$\{I\}^*_i = [\alpha\{I_e\}_{i+1} + (1-\alpha)\{I_e\}_i]\,\Delta t - (1-\alpha)[K]_i\{A\}_i\,\Delta t + [T](\{A\}_i + \{A_0\}_i$$

überführen. Wesentliche Probleme bei der Lösung von (4) sind die Berücksichtigung von $\{A_0\}$ sowie die Wahl des Wichtungsfaktors α und der Zeitschrittweite Δt.

Elektrische Zusatzbedingungen stellen eine für die zweidimensionale quasistationäre Magnetfeldberechnung spezifische Art von Nebenbedingungen dar. Man unterscheidet zwischen Speise- und Schaltungsbedingungen. In Abhängigkeit von der Notwendigkeit, Stromverdrängungseffekte zu berücksichtigen, wird im Modell $\varkappa \neq 0$ bzw. $\varkappa = 0$ gesetzt. Die Ermittlung von $\{A_0\}$ sei am Beispiel der Speisebedingung mit Berücksichtigung von Stromverdrängung erläutert: Mit $\{A_0\} = 0$ erhält man den resultierenden Strom im Leiter durch

$$i = i_e - \varkappa \int_S \frac{\partial A}{\partial t} \, dS. \tag{5}$$

Zur Interpretation der beiden Anteile dient die Spannungsgleichung der Wicklung

$$u = i R_\sim + \frac{d\psi}{dt}, \tag{6}$$

wobei $R_\sim$ den unter dem Einfluß der Stromverdrängung erhöhten ohmschen Widerstand darstellt. Über die magnetische Energie

$$W_m = \int_0^\psi i \, d\psi = l \int_S \int_0^A G \, dA \, dS \tag{7}$$

läßt sich die Flußverkettung in (6) ersetzen:

$$u = i R + \frac{l}{i} \int_S G \frac{\partial A}{\partial t} \, dS. \tag{8}$$

$$\text{Mit } R_\sim = R_- k_r = R_- \frac{S \int G^2 \, dS}{i^2} \tag{9}$$

und unter Berücksichtigung von (1) bzw. (5) erhält man aus (8)

$$u = i R_- + \frac{l}{S} \int_S \frac{\partial A}{\partial t} \, dS. \tag{10}$$

Während die Aufteilung der Spannung in (8) nach dem Kriterium der Energie (Verluste bzw. magnetische Energie) erfolgt, wird die Zuordnung in (10) nach dem Feldtyp (Potential- oder Wirbelfeld) vorgenommen. Nach dem Leiterstrom umgestellt, ergibt (10)

$$i = \frac{u}{R_-} - \frac{1}{R_-} \frac{l}{S} \int_S \frac{\partial A}{\partial t} \, dS, \tag{11}$$

und der Vergleich mit (5) liefert

$$i_e = \frac{u}{R_-}. \tag{12}$$

Die Eingabegröße i_e ist spannungsproportional, d.h. ohne Zusatzpotentiale entsprechen die Verhältnisse im Modell einer Speisung durch eine ideale Spannungsquelle ($R_i = 0$). Soll ein Innenwiderstand $R_i > 0$ berücksichtigt werden, nimmt (11) die Form

$$i = \frac{u}{R_- + R_i} - \frac{1}{R_- + R_i} \frac{l}{S} \int_S \frac{\partial A}{\partial t} \, dS \tag{13}$$

an, aus der man durch Umformung

$$i = \frac{u}{R_- + R_i} + \frac{R_i}{R_- + R_i} \frac{1}{R_-} \frac{l}{S} \int_S \frac{\partial A}{\partial t} \, dS - \frac{1}{R_-} \frac{l}{S} \int_S \frac{\partial A}{\partial t} \, dS \tag{14}$$

erhält. Andererseits wandelt man (5) durch Ergänzung der Zusatzpotentiale in

$$i = i_e - \varkappa \int_S \frac{\partial A_0}{\partial t} \, dS - \varkappa \int_S \frac{\partial A}{\partial t} \, dS \tag{15}$$

um. Der Vergleich von (14) und (15) liefert

$$i_e = \frac{u}{R_- + R_i} \tag{16}$$

und

$$A_0 = - \frac{R_i}{R_- + R_i} \frac{1}{S} \int_S A \, dS. \tag{17}$$

Für $R_i \to \infty$ ergibt die Vorschrift zur Ermittlung der Zusatzpotentiale einen Term, der gerade so groß ist, daß aus (15) $i = i_e$ wird, d.h. Stromeinspeisung vorliegt.

Der Zusammenhang zwischen magnetischen Vektorpotentialen A und Zusatzpotentialen A_0 läßt sich direkt in der Matrix $[T]$ berücksichtigen.

Das führt jedoch i. allg. dazu, daß Bandstruktur und Symmetrie dieser Matrix verlorengehen und damit Schwierigkeiten bei der Lösung des Gleichungssystems entstehen. Aus diesem Grunde erfolgt die Berücksichtigung der Zusatzpotentiale iterativ in der rechten Seite des Gleichungssystems. Diese Vorgehensweise ist besonders beim Zeitschrittverfahren günstig, da mit dem Vektor $\{A_0\}_i$ eine gute Startnäherung für den Vektor $\{A_0\}_{i+1}$ vorliegt. Die iterative Korrektur der Zusatzpotentiale erfolgt wie die Korrektur der Reluktivitäten im äußeren Zyklus, wobei sich die Anzahl der benötigten äußeren Schleifen und damit die Rechenzeit erhöht.

Zur Bestimmung von Richtwerten für die Parameter α und Δt wurden am Magnetkreis einer Drosselspule numerische Experimente durchgeführt. Bild 5 zeigt den zeitlichen Verlauf des Spulenstroms beim Einschalten einer Gleichspannung für verschiedene Werte von α und Δt. Für $\alpha = 1$ traten bei $\Delta t \leqq 0{,}03\,\tau$ kaum noch Änderungen im Stromverlauf auf, so daß diese Kurve zum Vergleich diente. Bei $\alpha = 0{,}5$, d.h. an der Stabilitätsgrenze des Verfahrens, lagen die Ergebnisse bereits bei $\Delta t \leqq 0{,}3\,\tau$ auf dieser Vergleichskurve, ohne daß Oszillation auftraten.

Da die benötigte Zeitschrittweite wesentlich von der maximalen Stromänderungsgeschwindigkeit abhängt, läßt sich Δt für andere zeitliche Verläufe aus den ermittelten Werten beim Spannungssprung ableiten. So erhält man z.B. bei der Sinusfunktion

$$\Delta t_\sim = \frac{\Delta t}{\omega \tau}, \tag{18}$$

und es ergibt sich für $\alpha = 1$, $\Delta t = 0{,}03/\omega$ und für $\alpha = 0{,}5$, $\Delta t = 0{,}3/\omega$, d.h. in Abhängigkeit von α eine Anzahl von 100 bzw. 10 Zeitschritten je Halbwelle. Die durchgeführten Rechnungen bei einer vorgegebenen sinusförmigen Spannung bestätigen diese Werte. Obwohl auf Grund der Problemabhängigkeit die an der Drosselspule ermittelten Werte nicht ohne weiteres auf andere Anordnungen übertragbar sind, liefern sie doch brauchbare Abschätzungen.

Die Anwendung des Zeitschrittverfahrens ist vor allem bei Berechnung stark gesättigter Magnetkreise sowie bei der Behandlung von Schalt- und Einschwingvorgängen sinnvoll. Als Beispiel wurde die erste Periode des Einschaltvorganges einer vierpoligen Asynchronmaschine mit Kurzschlußläufer berechnet ($f = 50$ Hz, $\Delta t = 1$ ms, $\alpha = 0{,}5$). Dabei wurde angenommen, daß sich der Läufer noch nicht bewegt. Effekte des Stirnfeldes wurden ebenfalls vernachlässigt. Eingabegröße war die Klemmenspannung der Maschine.

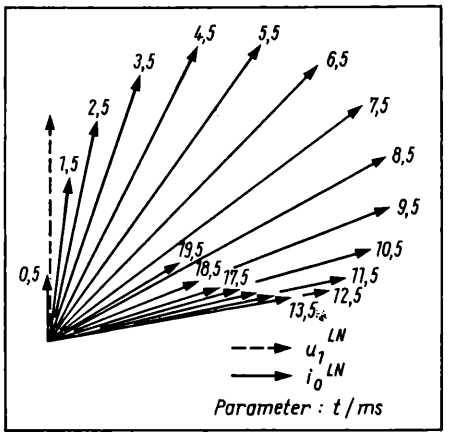


Bild 6. Einschalten einer vierpoligen Asynchronmaschine mit Kurzschlußläufer
a) Raumzeiger des Magnetisierungsstromes und der Ständerspannung in Netzkoordinaten

Bild 6a zeigt den typischen Verlauf des Magnetisierungsstrom-Raumzeigers in Netzkoordinaten, der sich spiralförmig auf den zu erwartenden stationären Endwert hin bewegt. Das Feldbild bei $t = 2$ ms (Bild 6b) macht die auf Grund des Prinzips der Flußkonstanz zu diesem Zeitpunkt noch geringe Läuferflußverkettung und die hohe Spaltstreuung deutlich. Dagegen zeigt Bild 6c) bei $t = 12$ ms die wesentlich stärkere Verkettung des Flusses mit der Läuferwicklung. Die Drehfeldbewegung ist aus dem Vergleich beider Feldbilder leicht ersichtlich. Eine weitere Auswertung, z.B. zur Ermittlung des Anlaufmoments, ist möglich.

5. Auswertung der Vektorpotentialverteilung

Für die effektive Anwendung der numerischen Feldberechnung bei der Entwicklung elektrotechnischer Erzeugnisse verfügt das Pro-

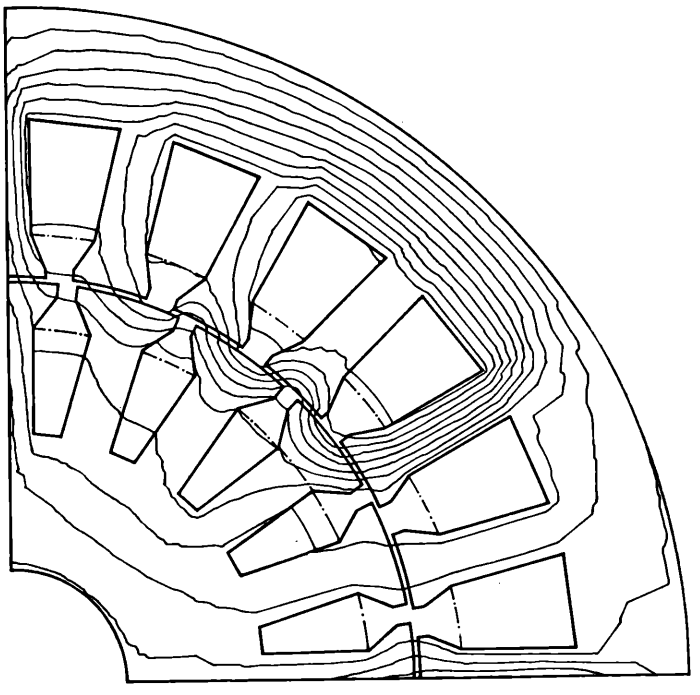


Bild 6 b) Feldbild bei $t = 2$ ms

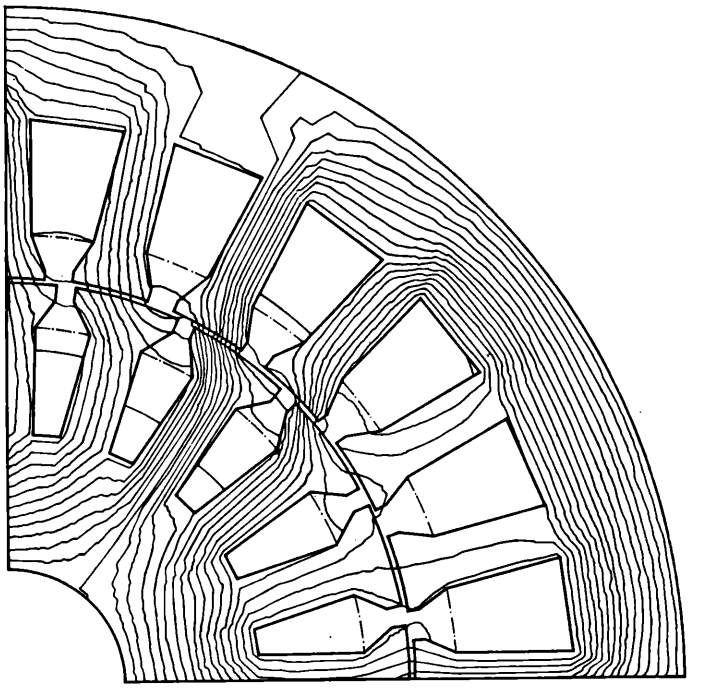


Bild 6 c) Feldbild bei $t = 12$ ms

grammsystem XFEL über Möglichkeiten zur ingenieurmäßigen Auswertung der berechneten diskreten Vektorpotentialverteilung. Neben der üblichen allgemeinen Auswertung wie Ermittlung von Feldbildern, Berechnung der magnetischen Induktion und der magnetischen Spannung ist eine problemorientierte Auswertung vorgesehen. Sie kann durch den modularen Programmausbau mit definierten Schnittstellen ständig ergänzt werden. So sind gegenüber [3] folgende Erweiterungen vorgesehen:

• *Magnetische Teilflüsse*

Beliebige Teilflüsse lassen sich durch die Vorgänge der entsprechenden Fläche, die im 2D-Bild durch 2 Punkte definiert ist, bestimmen. In technischen Geräten interessiert oft der Teilfluß durch charakteristische Flächen. Dazu müssen aus dem Feldbild außer den Extremwerten des Vektorpotentials auch der sogenannte Tangenten- und der Sattelpunkt gefunden werden. Im Tangentenpunkt berührt die Feldlinie die betrachtete Oberfläche, z.B. die Läuferoberfläche in elektrischen Maschinen, ohne sie zu durchdringen.
Bestimmt wird der Tangentenpunkt durch die Suche der Koordinaten, in denen das Vektorpotential auf der betrachteten Oberfläche, im 2D-Bild auf der dazugehörigen Strecke, einen Extremwert hat.
Der Sattelpunkt tritt zwischen räumlich auseinanderliegenden Stromgebieten mit gleicher Stromrichtung auf. In diesem Punkt gilt $\vec{B} = 0$. In der Lösung des diskreten Problems ist dieser Punkt dadurch zu finden, daß von ihm Linien mit $A = A_s = \text{const}$ in 4 unterschiedliche Richtungen verlaufen. Sind diese Punkte gefunden, können beispielsweise bei einer belasteten Gleichstrommaschine nach Bild 7 folgende Teilflüsse bestimmt werden:

— Streufluß der Pollücke

$$\Phi_\sigma = l\,(A_{\max,\,o} - A_t + A_{\max,\,u} - A_s) \tag{19}$$

— Wendepolfluß, der in den Läufer eintritt

$$\Phi_{WP} = l\,(A_t - A_s) \tag{20}$$

— Hauptpolfluß, der in den Läufer eintritt

$$\Phi_{HP} = l\,(A_t + A_s). \tag{21}$$

• *Magnetische Flußverkettung und Induktivitäten*

Die Ermittlung der Flußverkettung einer Spule erfolgt mit dem Mittelwert des Vektorpotentials über dem Spulenquerschnitt

$$\psi = \psi^+ - \psi^- \tag{22}$$

mit

$$\psi^\pm = \frac{l}{3}\,\frac{w^\pm}{S^\pm_{sp}}\,\Sigma_{S^\pm_{sp}}\,[(A_i + A_j + A_k)\,S^e].$$

S^e Elementfläche,
S_{sp} Spulenquerschnitt.

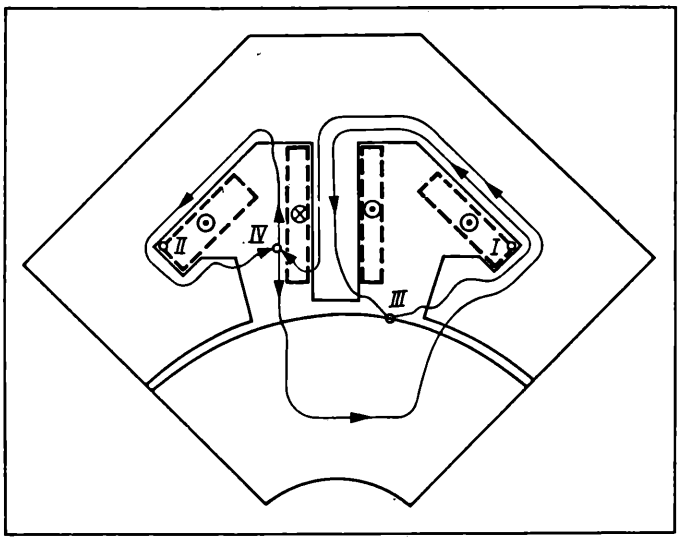


Bild 7. Punkte mit charakteristischen Potentialwert am Beispiel Gleichstrommaschine (schematischer Querschnitt)
I: $A_{\max,\,o}$ maximale Potentiale an den Erregerwicklungen
II: $A_{\max,\,u}$
III: A_t Potential am Tangentenpunkt
IV: A_s Potential am Sattelpunkt

Bei Dreieckselementen 1. Ordnung gilt (22) unabhängig von der Diskretisierung der Einzelleiter, d.h. unabhängig von der Größe der Elementfläche bezüglich des Leiterquerschnittes.
Mit bekannter Flußverkettung ist die Induktivität der Spule bzw. Wicklung bestimmbar. Bei magnetischer Kopplung von m-stromführenden Wicklungen sind zur Induktivitätsberechnung außer der Berechnung des resultierenden Feldes zusätzlich m-lineare Feldberechnungen erforderlich.
Dabei ist jeweils nur eine Wicklung stromführend. Wurden bei der Berechnung des quasistationären Feldes mit komplexen Vektorpotentialen bereits elektrische Zusatzbedingungen mit dem Hilfsmatrixverfahren berücksichtigt [8], kann die Ermittlung der Teilinduktivitäten damit gekoppelt werden. Die zur Berechnung der Induktivitäten benötigten Gleichungen sind in [7] angegeben.

• *Verluste*

Die Stromwärmeverluste lassen sich mit der Stromdichte nach (1) ermitteln. Bei Vorgabe von $G_e = 0$ sind damit auch die Wirbelstromverluste in leitfähigen Gebieten bestimmbar.
In geblechten Magnetkreisen ist die Rückwirkung der Wirbelströme auf die Magnetfeldausbildung meist vernachlässigbar. Die Feldberechnung erfolgt in diesen Gebieten mit $\varkappa = 0$. Die für die

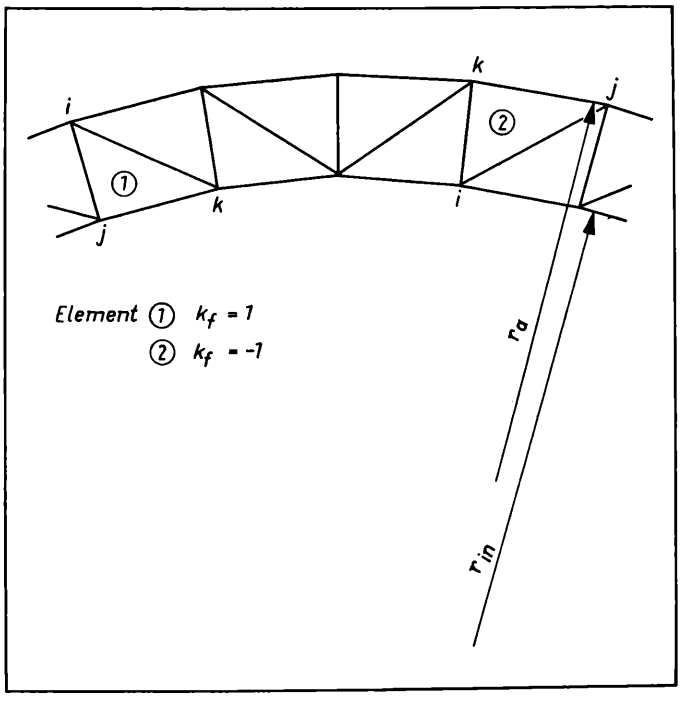


Bild 8. Lage der Dreieckelemente bei Momentenberechnung

Wirbelstromverluste maßgebende Stromdichte kann für Bleche mit einer hinreichend kleinen Dicke d trotzdem näherungsweise aus den berechneten Feldgrößen abgeleitet werden [8]. Im Fall des Zeitschrittverfahrens mit einem zeitlich linearen Vektorpotentialverlaufes während der Dauer Δt eines Zeitschrittes k ergeben sich daraus die Wirbelstromverluste mit

$$P_{w,k} = \frac{l_{Fe} \varkappa d^2}{12 \Delta t^2} \sum_{El.} \{(B_{x,k+1} - B_{x,k})^2 + (B_{y,k+1} - B_{y,k})^2 S^e\}. \tag{23}$$

Während der Zeit Δt sind die Stromdichte und die Verluste zeitlich konstant. Die Auswirkungen einer unvollständigen Blechisolation, des Stanzgrates usw. sind ebenso wie bei der klassischen Verlustberechnung nur durch einen Zuschlagfaktor erfaßbar. Bei Anwendung des komplexen Vektorpotentials erhält man für die Wirbelstromverluste im Blechpaket

$$P_w = \frac{l_{Fe} \varkappa d^2 \omega^2}{12} \sum_{El.} \{(\hat{B}_m^2 + \hat{B}_g^2) S^e\}. \tag{24}$$

Eine vereinfachte Ermittlung der Wirbelstromverluste in geblechten Magnetkreisen ist mit den bekannten klassischen Beziehungen möglich. Die Hystereseverluste werden mit dem klassischen Näherungsverfahren ermittelt. Dazu sind die aus der Feldberechnung bestimmbaren maximalen Induktionswerte in jedem Element notwendig.

• *Kräfte und Drehmoment*

Die Berechnung resultierender Kräfte und des resultierenden Drehmoments elektrischer Maschinen kann nach der Hüllflächenmethode [3] erfolgen. Infolge des durch die Diskretisierung mit Dreieck-Elementen 1. Ordnung bedingten Lokalisierungsfehlers ist der Fehler bei der Drehmomentbestimmung sehr stark vom gewählten Hüllflächenradius abhängig.

Günstiger hinsichtlich des Fehlerverhaltens ist es, die Methode der virtuellen Verschiebung direkt auf das betrachtete Konstruktionsteil anzuwenden. Unter Beachtung der bei der Feldberechnung realisierten Minimierungsbedingung hinsichtlich der Energie gilt beispielsweise für die Kraftkomponente in x-Richtung

$$F_x = \left.\frac{\partial W}{\partial x}\right|_{\{A\} = \text{const}}. \tag{25}$$

Wegen $\{A\} = \text{const}$ ist innerhalb des Reaktionsteils $\partial W / \partial x = 0$ und die Integration zur Lösung von (24) kann auf die Elementreihe, die das betrachtete Gebiet mit dem übrigen Feldgebiet verbindet, beschränkt werden. Zur Bestimmung des Drehmoments elektrischer Maschinen ist eine Elementreihe im Luftspalt zu betrachten (Bild 8). Aus der berechneten Kraft ergibt sich

$$M = \frac{l_i}{2} \nu_0 \sum_{El\,\delta} \left\{ k_f r_i^e \left[B_t (A_k - A_j) - \frac{B^2}{2} (r_k - r_j) \right] \right\} \tag{26}$$

mit $k_f = \pm 1$ je nach Lage der Dreieckelemente. Bei konzentrisch zum Drehpunkt liegender Elementreihe vereinfacht sich die Gleichung zu

$$M = \frac{r_i^e}{r_a^e - r_i^e} l_i \nu_0 \sum_{El\,\sigma} (B_r B_t S^e). \tag{27}$$

Bei der Auswertung ist zu beachten, daß sich der Fehler der aus der Näherungslösung des Vektorpotentials abgeleiteten physikalischen Größen gegenüber dem der Vektorpotentiale vergrößern kann. Eine ingenieurmäßige Einschätzung ist u.a. durch Vergleichsrechnungen in einem verfeinerten Gitternetz möglich.

Literatur

[1] *Hafner, Chr.:* Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder. Berlin: Springer Verlag 1987

[2] *Cristina, S.; Di Napoli, A.:* Combination of finite and boundary elements for magnetic field analysis. IEEE Trans. MAG 19 (1983) 6, S. 2337

[3] *Kunze, W.; Kuß, H.; Binner, A.:* CAD-Baustein numerische Feldberechnung für elektrotechnische Erzeugnisse. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 12, S. 455

[4] *Kunze, W.; Körting, R.:* Numerische Feldberechnung im Ausbildungsprozeß. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 10, S. 369

[5] *Müller, W.:* Numerische Feldberechnung als Instrument zur Entwicklung und Optimierung elektrischer Geräte. Arch. f. Elektrotechn. 69 (1986), S. 295

[6] *Kunze, W.; Kuß, H.; Binner, A.:* Numerische Feldberechnung für elektrotechnische Erzeugnisse mit unterschiedlicher Hardware. Wiss. Z. d. TU Dresden 37 (1988) 4, S. 163

[7] *Kunze, W.; Kuß, H.; Binner, A.:* Ermittlung von Parametern elektrischer Maschinen mit numerischer Feldberechnung. ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 7, S. 255–257

[8] *Binner, A.:* Numerische Berechnung stationärer und quasistationärer elektromagnetischer Felder in elektrotechnischen Erzeugnissen. Dissertation A, TU Dresden 1989

EA 6070

Jetzt in stark bearbeiteter Auflage!

TECHNIK-WÖRTERBUCH

Polytechnisches Wörterbuch

Französisch – Deutsch

Mit etwa 100000 Wortstellen aus allen technischen Gebieten einschließlich der für die Technik wichtigen Begriffe aus den naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern.

Das Wörterbuch wurde aktualisiert und um etwa 45000 Wortstellen erweitert.

Herausgegeben von Dr. phil. Aribert Schlegelmilch.

5., stark bearbeitete Auflage. Zwei Bände, 1164 Seiten, Leinen, Bde. I/II 95,— M; 110,— DM.

Bestellangaben: 554106 2/Schlegelmilch, Polyt. F-D

Auslieferung in diesen Tagen durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Numerische Magnet- und Wärmefeldberechnungen in Großtransformatoren

G. Puchner, KDT; M. Lindner, KDT; D. Roseburg, KDT; Dresden

Die bei der Auslegung von Transformatoren mit analytischen Verfahren berechneten Übertemperaturen sind Durchschnittswerte und lassen keinen Schluß auf eventuelle Heißpunkte oder auf thermisch schlecht ausgenutzte Bauteile zu. Bei der angestrebten hohen Ausnutzung des Materials sind die teilweise auf Erfahrungswerten beruhenden traditionellen Methoden der analytischen Temperaturfeldberechnung nicht in jedem Fall anwendbar. Dagegen können mit numerischen Verfahren auch ungewöhnliche Betriebsfälle modelliert und ihre Wirkungen auf die Temperaturverteilung untersucht werden.

1. Verlustberechnung in Großtransformatoren

Die Verluste in großen Transformatoren setzen sich im wesentlichen aus den Stromwärmeverlusten der Wicklungen, den Ummagnetisierungsverlusten des Kerns und den Zusatzverlusten in den inaktiven Bauteilen zusammen. In den Wicklungen entstehen die Stromwärmeverluste

$$p_v = G^2/\varkappa, \tag{1}$$

wobei der Einfluß der Stromverdrängung auf die Leitfähigkeit zu berücksichtigen ist. Die Verteilung der Verluste über den Wicklungsquerschnitt wird als gleichmäßig angenommen.

Das magnetische Wechselfeld erzeugt in den inaktiven Bauteilen wie Kessel, Preßeisen, Spulendruckplatten und deren Abschirmungen vor allem Wirbelstromverluste. Die Ermittlung dieser Verluste erfordert die Berechnung des Magnetfeldes. Dazu eignet sich die Methode der finiten Elemente (MFE), die gegenüber anderen gebräuchlichen numerischen Methoden Vorteile hinsichtlich

— einer variablen Gitternetzgestaltung
— der Berücksichtigung veränderlicher Materialeigenschaften
— der direkten Verknüpfung von Magnetfeld- und Temperaturfeldberechnung durch geringfügige Änderung des Lösungsalgorithmus hat.

Die grundlegende zweidimensionale Differentialgleichung (2) für das magnetische Feld lautet:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)+G_z=0. \tag{2}$$

Die Stromdichte G_z setzt sich aus dem eingespeisten Strom G_{ze} und dem Wirbelstrom G_{zw} zusammen. Werden sinusförmig sich ändernde Größen vorausgesetzt, so ergibt sich:

$$\underline{G}_z = \underline{G}_{ze} - \mathrm{j}\,\omega\,\varkappa\,(\underline{A}_z + \underline{C}). \tag{3}$$

Die Lösung nach der Methode der finiten Elemente erfolgt über Ansatzfunktionen, die den Verlauf des Vektorpotentials im gesamten Berechnungsgebiet darstellen. Dann kann durch Minimierung einer der DGL entsprechenden Variationsaufgabe

$$\underline{F}=\int_s\left[\frac{1}{2\mu}\left(\left(\frac{\partial \underline{A}_z}{\partial x^2}\right)^2+\left(\frac{\partial A_z}{\partial y^2}\right)^2\right)-\underline{A}_z\,\underline{G}_{ze}+\underline{A}_z\,\varkappa\,\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\,\underline{A}_z+\underline{C}\right)\right]\mathrm{d}S \tag{4}$$

das Vektorpotential ermittelt werden. Die Wirbelstromdichte folgt aus (3). Die Integrationskonstante $\underline{C}$ ergibt sich aus dem Ansatz, daß die Summe aller Wirbelströme in einem Wirbelstromgebiet Null ist. Zur Feldberechnung mit dem Programm EMTFELD wird das Berechnungsgebiet (Bild 1) in Dreieckselemente diskretisiert. Die Ansatzfunktion für das Vektorpotential ist linear. Das entstehende Gleichungssystem hat die Form

$$[K]\,\{\underline{A}_z\} = \{F\}. \tag{5}$$

Das Gleichungssystem wird mit dem Eliminationsverfahren gelöst. Zur Berücksichtigung der Magnetisierungskennlinie kann eine Newton-Raphson-Iteration überlagert werden. Als Ergebnis werden die Verlustdichten in allen wirbelstrombehafteten Bauteilen ausgegeben. Durch Einführung mehrerer Schnittebenen (Bild 2) kann auch eine räumliche Verteilung der Verluste ermittelt werden. Allerdings sinkt mit wachsendem Schnittwinkel auch die Genauigkeit der Ergebnisse. Einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Verlusten im Preßeisen enthält Bild 3.

2. Ermittlung des Temperaturfeldes [1]

Die Verlustdichte in den Elementen bildet die Grundlage zur Temperaturfeldberechnung mit dem Programm EMTFELD. Die allgemeine mathematische Beschreibung des Wärmetransports in ruhenden Medien mit innerer Energiequelle lautet:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial \vartheta}{\partial y}\right)+q=\frac{\partial}{\partial t}(\varrho\,c\,\vartheta) \tag{6}$$

bzw. für den stationären Fall $\left(\frac{\partial}{\partial t}=0\right)$ bei $\lambda = \text{const}$:

$$\lambda_x\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2}+\lambda_y\frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2}+q=0. \tag{7}$$

Die Lösung von (6) oder (7) nach der Methode der finiten Elemente führt zu dem Gleichungssystem

$$[K]\,\{\vartheta\} = \{F\}, \tag{8}$$

das in seinem Aufbau große Ähnlichkeit mit (5) hat. Die Randbedingungen für das Berechnungsgebiet haben entscheidenden Einfluß auf die Lösung. Folgende Randbedingungen sind möglich:

1. Art: Temperaturen auf dem Rand werden vorgegeben

$$\vartheta = \vartheta\,(x, y), \tag{9}$$

2. Art: Vorgabe der Wärmestromdichten

$$q = q\,(x, y), \tag{10}$$

3. Art: konvektive Wärmeabgabe

$$\Phi = \alpha\,(\vartheta_1 - \vartheta_0). \tag{11}$$

3. Temperaturfeldberechnung in einem Modelltransformator

Die Berechnungen und Messungen erfolgten an einem im Maßstab $1/\sqrt{10}$ verkleinerten 50-MVA-Transformator, der als Trockentransformator bei einer Modellfrequenz von 500 Hz betrieben wurde. Die Erfassung und Lokalisierung der Ummagnetisierungsverluste im Kern ist wegen der ungleichmäßigen Flußverteilung in den Blechen sehr kompliziert. Deshalb werden die durch Messungen gewonnenen Temperaturen an der Kernoberfläche als Randbedingungen vorgegeben. Unter Anwendung der Gl. (1) ergaben sich die in Tafel 1 angegebenen Verlustdichten in den Wicklungen. Die Wirbelstromverluste in der Kesselwand, der Kesselschräge und im Kernpreßeisen wurden nach dem im Abschn. 1. beschriebenen Verfahren berechnet.

Die Wärmeleitfähigkeit der Materialien kann als konstant angesehen werden. Der für Luft verwendete Wert entspricht einer Temperatur von 80 °C. Infolge der im Modell möglichen freien Konvektion der Luft wurde die Leitfähigkeit mit dem Faktor 3 korrigiert [2]. Tafel 2 zeigt die eingesetzten Größen.

Von großer Bedeutung für die Erwärmung ist der Wärmeübergang zwischen den Bauteilen des Transformators und der Luft als Kühlmedium. Die Berechnung der Wärmeübergangszahlen ist nach den Ähnlichkeitsfunktionen möglich [1]. Dazu muß zunächst das Produkt $(Gr\,Pr)$ bestimmt werden:

$$Gr\,Pr = k_s\,l_w^3\,(\vartheta_1 - \vartheta_0), \tag{12}$$

$$Nu = n_1\,(Gr\,Pr)^{c_1}. \tag{13}$$

n_1 und c_1 sind für die verschiedenen Anordnungen experimentell bestimmt. Die charakteristische Länge l_w wurde mit 1 m angesetzt. Die Gleichung für den Wärmeübergangsfaktor ist:

$$\alpha_k = Nu\,\lambda/l_w. \tag{14}$$

Dabei ist λ die Wärmeleitfähigkeit des Kühlmediums. Zur Ermittlung der α_k-Faktoren ist die Kenntnis der Temperaturdifferenz zwischen dem Bauteil und der Umgebung notwendig. Daher sind vor Beginn der Rechnung Annahmen zu treffen bzw. Meßwerte zum

Dipl.-Ing. *Gerald Puchner* und Dipl.-Ing. *Matthias Lindner* sind wissenschaftliche Assistenten, Prof. Dr. sc. techn. *Detlev Roseburg* ist Leiter des Bereichs Elektrische Maschinen an der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik.

Tafel 1

Fläche	P_v W/m³
1	16291,8
2	16291,8
3	10757,5
4	9908,0
5	9714,0

Tafel 2

Material	λ W/mK
Luft	0,09
Kupfer	385,0
Stahl	59,0

Tafel 3

Bauteil	α_k W/m²K
Kessel innen	4,2
außen	8,5
Preßeisen	3,5
Wicklung	8,6

Tafel 4

Teil	ϑ °C
Wicklung	105
Kern	40
Kessel	40

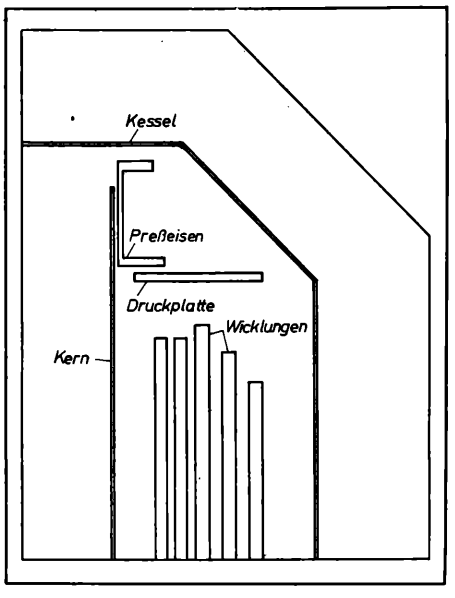


Bild 1. Querschnitt des Modelltransformators ◀

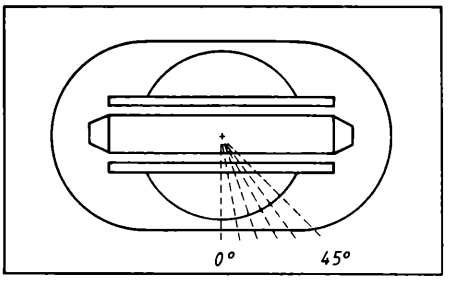


Bild 2. Lage der Schnittebenen im Modelltransformator

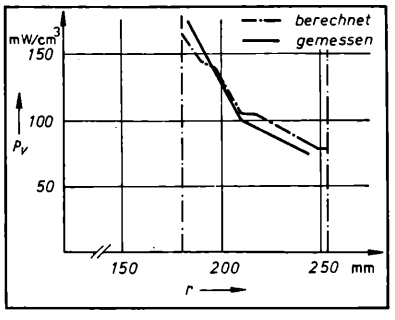


Bild 3. Gemessene und berechnete Verlustdichteverteilung an der Unterkante des Preßeisens

Bild 4. Berechnete Temperaturverteilung in den Schnittebenen

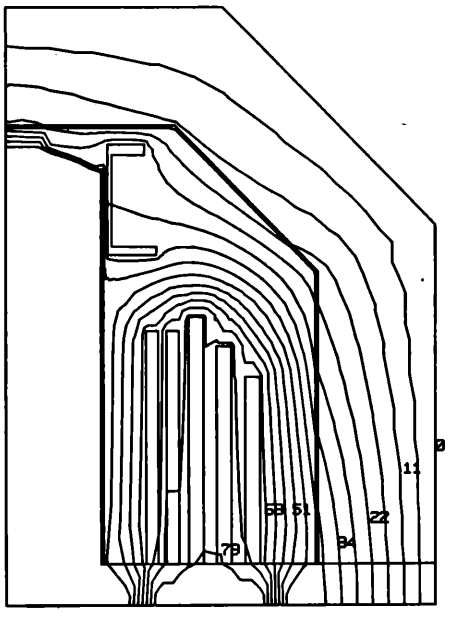


Bild 4 a) 0°

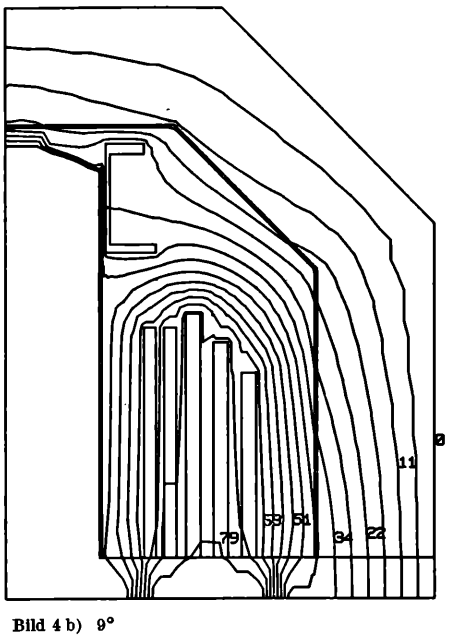


Bild 4 b) 9°

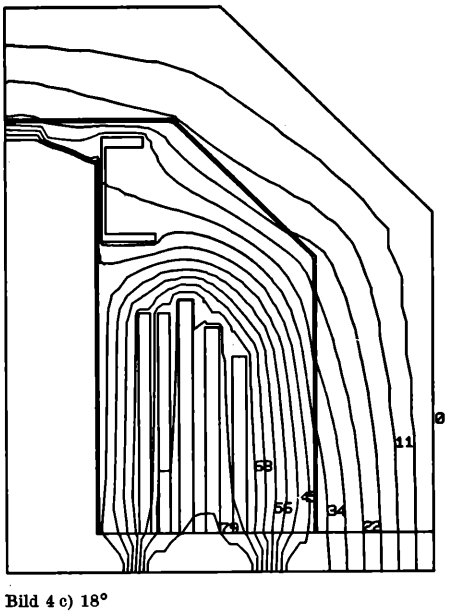


Bild 4 c) 18°

Vergleich heranzuziehen. Der Faktor c_1 ist bei den im Transformator vorkommenden Anordnungen 0,33, so daß die Abhängigkeit $\alpha_k(\Delta\Theta)$ gering ist. Es gilt

$$\alpha_k(\Delta\Theta) \sim \sqrt[3]{k_s(\Theta_1 - \Theta_0)}. \quad (15)$$

Wegen $c_1 = 0{,}33$ ist auch die Wahl der wirksamen Länge l_w in (14) unkritisch. Der Stoffwertkoeffizient k_s ist temperaturabhängig. Für Grenzwerte von 20 °C und 70 °C gilt:

$$10^8\ \mathrm{K^{-1}\,m^{-3}} \geqq k_s \geqq 5 \cdot 10^7\ \mathrm{K^{-1}\,m^{-3}}. \quad (16)$$

Tafel 3 enthält die berechneten α_k-Faktoren für verschiedene Bauteile.

Bei luftgekühlten Transformatoren ist ebenfalls die Wärmeabgabe durch Strahlung zu berücksichtigen:

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon C_s}{\Theta_1 - \Theta_0} s\left(\left(\frac{\Theta_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{\Theta_0}{100}\right)^4\right). \quad (17)$$

Für die Wärmeabstrahlung der Kesselwand nach außen ergibt sich damit für α_s 4,6 W/mK.

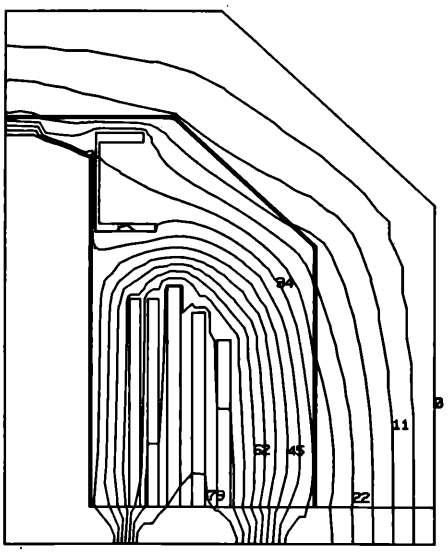
Für den Kurzschlußbetrieb entstehen die größten Verluste in der Wicklung. Die dort zulässige Höchsttemperatur ist 105 °C. Tafel 4 zeigt die vorgegebenen Werte.

Mit diesen Randwerten sowie den berechneten Verlusten ergeben sich die in den Bildern 4a) bis 4f) dargestellten Temperaturfelder. Die Belastung der Kesselwand ist sehr hoch, da keine Abschirmung vorhanden ist. Bild 5 zeigt einen Vergleich zwischen gemessener und berechneter Temperaturverteilung für einen Schnittwinkel von 0°, Ursachen für die mittleren Abweichungen von 10% zwischen gemessener und berechneter Verteilung sind:

— geometrische Abweichungen des zweidimensionalen Modells vom realen Objekt

— Verwendung konstanter Wärmeübergangszahlen

— Fehler in der Wirbelstromberechnung durch Auftrennung des Wirbelstromgebiets Kesselwand.



◀ Bild 4 d) 27°

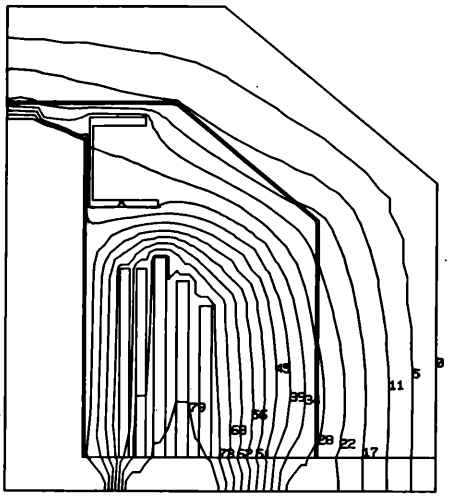


Bild 4 e) 36° ▲

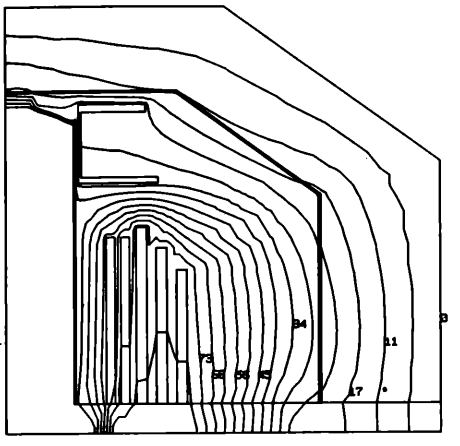


Bild 4 f) 45°

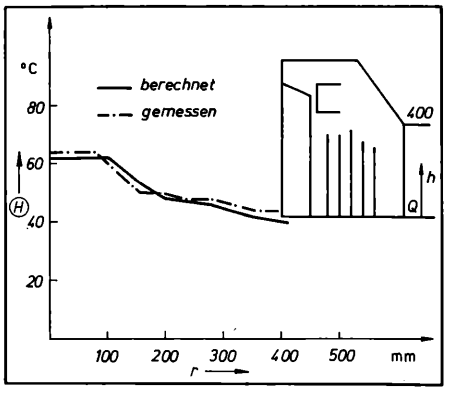


Bild 5
Gemessene und berechnete Temperaturverteilung in der Kesselwand

Alle Berechnungen erfolgten mit dem Programmsystem EMTFELD auf einem 16-bit-PC.

4. Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Methode ist es möglich, stationäre Temperaturfelder in Großtransformatoren zu berechnen. Voraussetzung dazu ist die Bestimmung der vom magnetischen Streufeld verursachten Wirbelstromverluste in den Bauteilen. Auf Grund der Analogie zwischen Magnet- und Temperaturfeld ist eine Lösung beider Probleme mit dem selben Algorithmus möglich, Als Beispiel diente ein luftgekühlter Modelltransformator. Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen zeigt eine qualitativ und quantitativ gute Übereinstimmung.

Literatur

[1] *Roseburg, D; Puchner, G.:* Numerische Wärmefeldberechnungen in Großtransformatoren. Wiss. Z. TU Dresden 38 (1989) 4, S. 165 – 169

[2] *Dao, N.:* Methode der finiten Elemente zur Berechnung von Temperatur- und Wärmestromfeldern in festen Körpern. Diss. TU Dresden (1982)

EA 6076

Lieferbar in zweiter Auflage. Im Fachbuchhandel erhältlich

Grundlagen der Automatisierungstechnik

Von Prof. Dr. sc. techn. Heinz Töpfer und Doz. Dr.-Ing. Peter Besch.
2., durchgesehene Auflage. 330 Seiten, 273 Bilder, Leinen, 24,— M; 36,— DM.
Bestellangaben: 554 013 1/Töpfer, Grundlagen

Grundkenntnisse der Automatisierungstechnik gehören zum Ausbildungsprofil aller technischen Fachrichtungen. Von besonderem Interesse für viele Leser werden die Ausführungen über Aufbau und Programmierung von Mikroprozessoren und Mikrorechnern sein. Aufgrund der praxisbezogenen Beispiele ist das Hochschullehrbuch auch für die Weiterbildung von Ingenieuren geeignet.

Hauptabschnitte: Einführender Überblick · Begriffe, Darstellungsformen, Funktionen · Grundkonzepte der Automatisierungstechnik · Diskrete Steuerungen · Mathematische Beschreibung analoger Steuerungselemente · Regelalgorithmen und Regeleinrichtungen · Beschreibung von Automatisierungsobjekten — Prozeßanalyse/Modellbildung · Entwurf und Verhalten von Regelkreisen · Systeme mit nichtlinearen Elementen · Konzipierung und Entwurf von Automatisierungslösungen.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Berechnung der Bedarfskoeffizienten in Industriebetrieben

G. Zoworka. Opole, VR Polen

Es wird ein neues statistisches Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Bedarfskoeffizienten in Industriebetrieben beschrieben. Das Verfahren beruht auf

— dem vorhandenen Meßdatenmaterial (Istwerte)
— laufend geprüften Meßdaten
— der mathematischen Statistik

und ist auf in Betrieb befindliche Elektroenergieabnehmer anzuwenden um eine Aktualisierung der Bedarfskoeffizienten durchzuführen. Es geht damit um eine Einsparung und Rationalisierung des Leistungs- und Energiebedarfs. Bei diesem Verfahren werden Meßdaten verwendet, die man mit dem Maxizähler im stündlichen Zeitniveau bei $T = 15$ min erhält. Die Meßdaten beziehen sich auf einen angenommenen Zeitraum: Tag, Woche, Monat, Jahresviertel sowie Jahr bei verschiedenen Arbeitsschichten der industriellen Elektroenergieabnehmer.

1. Statistische Berechnungsverfahren

Mit Hilfe des statistischen Leistungsermittlungsverfahrens besteht die Möglichkeit, die maximalen und minimalen Wirk- und Blindleistungen zu berechnen. Zunächst sind dazu einige Hilfsmittel nötig, um die Berechnungsgenauigkeit zu erhöhen.
Im Meßdatenumfang P_{Tk}, Q_{Tk} (für $k = 1, 2, \ldots, n$) können sich Meßdaten befinden, die im Verhältnis zu den anderen Meßdaten sehr abweichen. Deshalb ist es erforderlich, den Meßdatenumfang als sogenannte geordnete Stichproben darzustellen, z. B. für die Wirkleistungen $P_{1T}, P_{2T}, \ldots, P_{kT}, \ldots, P_{(n-1)T}, P_{nT}$ (für $k = 1, 2, \ldots, n$).
Diese Berechnung kann mit Hilfe verschiedener Ausreißertests, z. B. Dixon-Test [2], durchgeführt werden. Möchte man z. B. prüfen, ob der größte Meßwert P_{nT} als Ausreißer angenommen werden kann, so ist als Testgröße

$$t_d = \frac{P_{nT} - P_{(n-1)T}}{P_{nT} - P_{1T}} \tag{2}$$

zu verwenden.
Ist dagegen der kleinste Meßwert P_{1T} als Ausreißer anzunehmen, so verwendet man

$$t_d = \frac{P_{2T} - P_{1T}}{P_{nT} - P_{1T}}. \tag{3}$$

Für die Statistik $t_d > t_\alpha$ wird der extreme Meßwert P_{nT} nach Gl. (2) oder P_{1T} nach Gl. (3) aus dem Meßdatenumfang eliminiert und wiederum die Leistungskenngrößen $\overline{P}_T$, $\overline{Q}_T$, $\overline{s}_T$, $\overline{s}_{qT}$ bei $(n-1)$ Meßdaten berechnet, mit

P_{kT} Meßdaten der Wirkleistungen für $T = 15$ min
t_α kritischer (tabellierter) Wert nach der t-Verteilung bei $\alpha = 0{,}05$ und Meßdatenumfang n (für $t_d \leqq t_\alpha$ — Ho Hypothese) [2].

Im Meßdatenmaterial kann es mehrere Meßwerte geben, die als Ausreißer angesehen werden können. In diesem Fall wird der Dixon-Test mehrfach angewendet oder es werden andere Ausreißertests z. B. nach *Dawid*, berücksichtigt.
Gnedenko [1] zeigte, daß bei der effektiven Abnehmerzahl ($n_{\text{eff}} \geqq 6$) die Zufallsgrößen P_{Tk}, Q_{Tk} eine Normalverteilung bilden.[1])
Um das feststellen zu können, ist es nötig, den Stichprobenumfang nach (4) zu berechnen (z. B. für Wirkleistungen):

$$n_0 = \left(\frac{t_\alpha \, \overline{s}_T}{\delta}\right)^2. \tag{4}$$

Dr.-Ing. *Gerard Zoworka*, Technische Hochschule Opole, Institut für Technik, Lehrstuhl Elektrotechnik.

[1]) Die Normalverteilung der Wirk- und Blindleistungen kann durch verschiedene Tests erreicht werden, z. B. Pearson-Test, was hier nicht nötig ist.

$\overline{s}_T$ mittlere Standardabweichung der Wirkleistungen für $T = 15$ min [siehe Gl. (11)]
δ absoluter Fehler, z. B. 0,10 P_T (9), $t_\alpha = 1{,}96$.

Im Fall $n_0 < n$ ist ein neuer Stichprobenumfang für $n_1 > n - n_0$ zu wählen, und es sind wiederum die Kenngrößen $\overline{P}_T$, $\overline{s}_T$ für den $(n_1 + n_0)$-Stichprobenumfang zu berechnen sowie nochmals der Dixon-Test anzuwenden.
Die Zufallsgrößen P_{Tk}, Q_{Tk} (für $k = 1, 2, \ldots, n$) können durch zwei Leistungskenngrößen

— dem arithmetischen Mittelwert der Wirk- und Blindleistungen $\overline{P}_T$, $\overline{Q}_T$
— der mittleren Standardabweichung der Wirk- und Blindleistungen $\overline{s}_T$, $\overline{s}_{qT}$ [vgl. Gln. (5) bis (8)] (für $T = 15$ min) sowie durch die Leistungswahrscheinlichkeitsdichte φ (p_T)

dargestellt werden, wenn das erforderliche Meßdatenvolumen erreicht ist [Gl. (4)].
Die maximalen und minimalen Wirk- und Blindleistungen werden nach (5) bis (8) berechnet:

$$P_{T\max} = \overline{P}_T + t_\alpha \frac{\overline{s}_T}{\sqrt{n}}, \tag{5}$$

$$P_{T\min} = \overline{P}_T - t_\alpha \frac{\overline{s}_T}{\sqrt{n}}, \tag{6}$$

$$Q_{T\max} = \overline{Q}_T + t_\alpha \frac{\overline{s}_{qT}}{\sqrt{n}}, \tag{7}$$

$$Q_{T\min} = \overline{Q}_T - t_\alpha \frac{\overline{s}_{qT}}{\sqrt{n}}. \tag{8}$$

$P_{T\max}$, $Q_{T\max}$ maximale Wirk- und Blindleistungen
$P_{T\min}$, $Q_{T\min}$ minimale Wirk- und Blindleistungen
$\overline{P}_T$, $\overline{Q}_T$ arithmetische Mittelwerte der maximalen Wirk- und Blindleistungen
n Meßdatenanzahl
t_α kritischer (tabellierter) Wert nach der t-Verteilung [2],

$t_\alpha = f(\gamma, n)$ für $n > 30$ Meßdaten
$t_\alpha = f(\gamma, n-1)$ für $n \leqq 30$ Meßdaten
$\gamma = 1 - \alpha$ statistischer Konfidenzkoeffizient, z. B. $\gamma = 0{,}95$
Irrtumswahrscheinlichkeit/statistisches Sicherheitsniveau, z. B. $\alpha = 0{,}05$.

Berechnung der Leistungskenngrößen $\overline{P}_T$, $\overline{Q}_T$, $\overline{s}_T$, $\overline{s}_{qT}$:

$$P_T = \frac{\sum_{k=1}^{n} P_{Tk}}{n}, \tag{9}$$

$$Q_T = \frac{\sum_{k=1}^{n} Q_{Tk}}{n}, \tag{10}$$

$$s_T = \left[\frac{\sum_{k=1}^{n} (P_{Tk} - \overline{P}_T)^2}{\varphi}\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{11}$$

$$s_{qT} = \left[\frac{\sum_{k=1}^{n} (Q_{Tk} - \overline{Q}_T)^2}{\varphi}\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{12}$$

P_{Tk}, Q_{Tk} maximale Wirk- und Blindleistungen (für $T = 15$ min), aus dem Meßdatenmaterial durch den Maximumzähler erhalten
$\varphi = n$ für $n > 30$ Meßdaten
$\varphi = n - 1$ für $n \leqq 30$ Meßdaten.

Bemerkung: Bei Meßdaten, die durch Watt- und Variometer, Energiezähler sowie Registriergeräte ermittelt werden, entfällt in den Gln. (5) bis (8) das Glied $\sqrt{n}$.
Die statistischen Toleranzgrenzen der Wirk- und Blindleistungen werden nach dem zweiseitigen statistischen Toleranzintervall bestimmt:

$$P\{P_{T\min} < P_T < P_{T\max}\} = \gamma \tag{13}$$

$$P\{Q_{T\min} < Q_T < Q_{T\max}\} = \gamma. \tag{14}$$

Tafel 1. Meßdaten im Jahr 1984 (für $T = 15$ min)

Monate	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
P_{Tk}	2,80	2,75	2,79	2,55	2,15	2,65	1,95	2,40	2,45				MW
P_{Tk}	2,80	2,75	2,79	2,55	2,20	2,15	2,65	1,95	2,40	2,45	2,85	2,75	MW
Q_{Tk}	0,84	1,07	0,89	0,79	0,67	0,63	0,88	0,60	0,79	0,81	0,96	1,04	Mvar
A_c	1149,5	1151,7	1024,8	942,3	747,4	660,9	612,4	568,4	718,8	860,5	1073,7	1172,6	MWh
A_b	346,9	447,3	326,8	293,3	228,8	193,6	202,9	175,5	238,6	284,4	362,4	445,2	Mvar

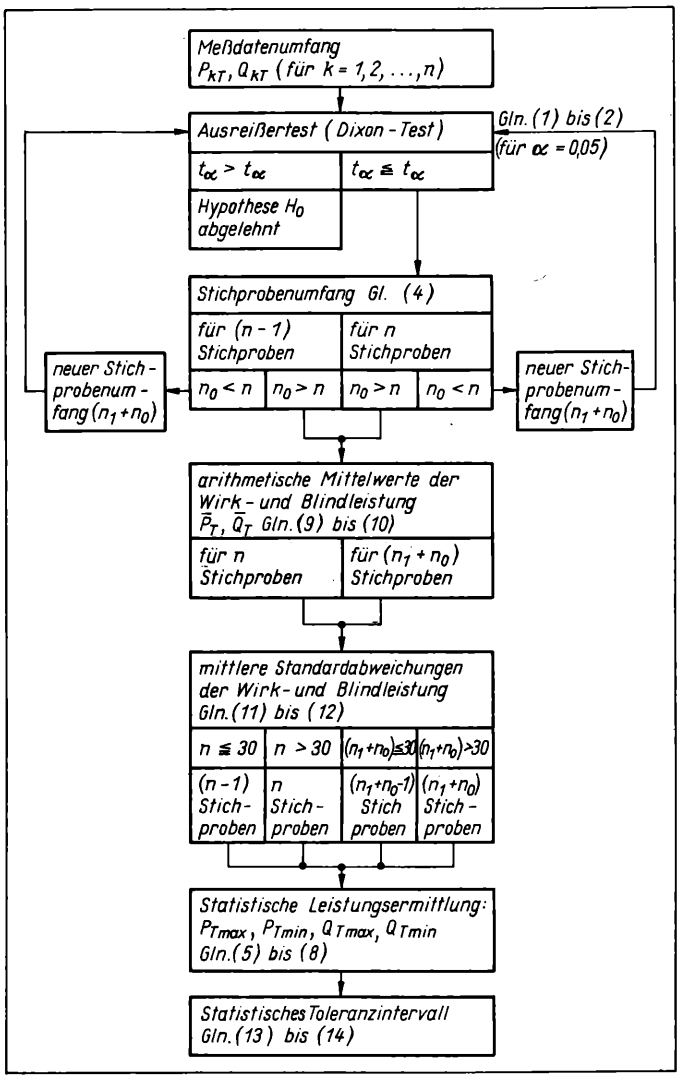


Bild 1. Statistisches Leistungsermittlungsverfahren (Algorithmus)

P_T, Q_T gesuchte maximale Wirk- und Blindleistung der Population im geprüften industriellen Betrieb.

Beim Meßdatenumfang für das Zeitniveau T_1 besteht die Möglichkeit, diese Meßdaten auf das Zeitniveau $T = 15$ min umzurechnen. Das geschieht durch die Umrechnung der Standardabweichung $\bar{s}_{T1}$ auf $\bar{s}_T$ nach (15), z. B. für die Wirkleistung

$$\bar{s}_T = \bar{s}_{T1} \left(\frac{T_1}{T}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{15}$$

die in die Gln. (5) bis (6) eingesetzt wird.
Im Bild 1 wird das statistische Berechnungsverfahren in Form eines Algorithmus dargestellt, z. B. für Wirkleistungen. Für die Blindleistungsermittlung sind die gleichen Berechnungsgrundlagen zutreffend.

2. Berechnung der spezifischen Bedarfskenngrößen

Die Ermittlung der spezifischen Bedarfskenngrößen für industrielle Elektroenergieabnehmer geschieht im Verhältnis zu der jährlichen Produktionsmenge des Betriebes.

2.1. Spezifische Nennleistung der Abnehmer

$$p_i = \frac{P_i}{M}. \tag{16}$$

P_i summierte Nennleistung der Abnehmer

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} P_{nk} \tag{17}$$

p_{nk} Wirknennleistung der einzelnen Abnehmer (für $k = 1, 2, \ldots, n$)
M jährliche Produktionsmenge des Betriebes, z. B. l, Mg, Stck.

2.2. Spezifischer Wirk- und Blindleistungsbedarf — maximaler und minimaler Wert (für $T = 15$ min)

$$p_{T\max} = \frac{P_{T\max}}{M}, \tag{18}$$

$$p_{T\min} = \frac{P_{T\min}}{M}, \tag{19}$$

$$q_{T\max} = \frac{Q_{T\max}}{M}, \tag{20}$$

$$q_{T\min} = \frac{Q_{T\min}}{M}. \tag{21}$$

$P_{T\max}, P_{T\min}, Q_{T\max}, Q_{T\min}$ nach den Gln. (5) bis (8).

2.3. Wirk- und Blindenergiebedarf

$$a_w = \frac{A_w}{M}, \tag{22}$$

$$a_b = \frac{A_b}{M}, \tag{23}$$

A_w, A_b jährlicher Wirk- und Blindenergiebedarf des Betriebes.

2.4. Bedarfskoeffizient — maximaler und minimaler Wert (für $T = 15$ min)

$$k_{cT\max} = \frac{P_{T\max}}{P_i}, \tag{24}$$

$$k_{cT\min} = \frac{P_{T\min}}{P_i}. \tag{25}$$

2.5. Leistungsfaktor cos φ_T (maximaler und minimaler Wert)

$$\cos \varphi_{T\max} = \frac{1}{(1 + \tan^2 \varphi_{T\max})^{1/2}}, \tag{26}$$

$$\cos \varphi_{T\min} = \frac{1}{(1 + \tan^2 \varphi_{T\min})^{1/2}}, \tag{27}$$

$$\tan \varphi_{T\max} = \frac{Q_{T\max}}{P_{T\max}}, \tag{28}$$

$$\tan \varphi_{T\min} = \frac{Q_{T\min}}{P_{T\min}}. \tag{29}$$

2.6. Wirk- und Blindleistungsbenutzungsstundenzahl (maximaler und minimaler Wert)

$$T_{wT\max} = \frac{A_w}{P_{T\max}}, \tag{30}$$

$$T_{wT\min} = \frac{A_w}{P_{T\min}}, \tag{31}$$

$$T_{qT\max} = \frac{A_b}{Q_{T\max}}, \tag{32}$$

$$T_{qT\min} = \frac{A_b}{Q_{T\min}}. \tag{33}$$

3. Beispiel: Berechnung der spezifischen Bedarfskenngrößen (für Wirkleistungen) in einem chemischen Industriebetrieb (Produktion von Konstruktionselementen)

Meßdaten für das Jahr 1984 sind in Tafel 1 angegeben.
Kenngrößen: $P_i = 17{,}11$ MW, $M = 2929$ Mg, $A_w = 10683$ MWh/a
Berechnung der Bedarfskenngrößen:

1. Dixon-Test nach Gl. (3)

$t_d = 0{,}222 < t_\alpha = 0{,}376$ [2], Tab. XIX, für $\alpha = 0{,}05$, $n = 12$

Der Meßwert $P_{1T} = 1{,}95$ kann als Ausreißer nicht angesehen werden.

2. Stichprobenumfang der Meßdaten nach Gl. (4)

$n_0 = 5{,}4 < n = 12$ bei $\delta = 0{,}10\, P_T$

3. Elektrische Bedarfskenngrößen

$\overline{P}_T = 2{,}52$ MW nach Gl. (9)
$\bar{s}_T = 0{,}30$ MW nach Gl. (11) für $n \leqq 30$
$P_{T\max} = 2{,}71$ MW nach Gl. (5)
$P_{T\min} = 2{,}33$ MW nach Gl. (6) für $\alpha = 0{,}05$ — zweiseitiger Test
$v = n - 1 = 11$ Anzahl der Freiheitsgrade
$t_\alpha = 2{,}20$ [2], Tab. V
$p_i = 5{,}86$ kW/Mg nach Gl. (16)
$p_{T\max} = 0{,}93$ kW/Mg nach Gl. (17)
$p_{T\min} = 0{,}80$ kW/Mg nach Gl. (18)
$a_w = 3{,}66$ MWh/Mg a nach Gl. (22)
$k_{cT\max} = 0{,}16$ nach Gl. (24)
$k_{cT\min} = 0{,}14$ nach Gl. (25)
$T_{wT\max} = 3942$ h/a nach Gl. (30)
$T_{wT\min} = 4585$ h/a nach Gl. (31).

4. Zusammenfassung

Es wird ein neues Leistungsermittlungsverfahren dargestellt, durch das die Möglichkeit besteht, die Wirk- und Blindleistungen für industrielle Elektroabnehmer im gewählten Zeitraum, z.B. Tag, Woche, Monat, Jahresviertel sowie Jahr, bei verschiedenen Arbeitsschichten zu berechnen. Dieses Verfahren beruht auf aktuellen Meßdaten, die durch Maximumzähler, Watt- und Variometer oder Wirk- und Blindleistungsregister ermittelt werden können. Die Meßdaten kann man auch mit Hilfe von Energiezählern in einer bestimmten Zeitintervalldauer, z.B. je Stunde, erhalten. Sind maximale Wirk- und Blindleistungswerte vorhanden — durch Maximumzähler bestimmt — sind für die Berechnung der maximalen und minimalen Wirk- und Blindleistungen die Gln. (5) bis (8) anzuwenden. Bei Benutzung von anderen Meßgeräten entfällt der Wert $\sqrt{n}$.

Literatur

[1] *Gnedenko, B. W.:* Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin: 1971
[2] *Storm, R.:* Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Statistische Qualitätskontrolle. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1979
[3] *Zoworka, G.:* Anwendung der statistischen Methoden zur Ermittlung elektroenergetischer Kenngrößen für industrielle Betriebe auf Grund der experimentellen Forschung. Wiss. Heft. PH Opole, Institut für Technik „Nauki Techniczne" No IX. (1984), S. 77–87 (poln.).
[4] *Zoworka, G.:* Elektroenergetische Kenngrößen in industriellen Betrieben. Energetyka (1983) 4, S. 139–142 (poln.).

EA 5663

Teilentladungssonde robotron M 4202 – technische Eigenschaften und Anwendungshinweise

H. Franzke; E. Geißler, KDT; D. Krieger, KDT; Dresden

Mitteilung aus dem VEB Robotron-Meßelektronik „Otto Schön" Dresden, Bereich Forschung und Entwicklung

Mit der Teilentladungssonde robotron M 4202 (Lemke-Sonde) liegt ein neues Erzeugnis vor, das insbesondere in der technischen Diagnostik bei Vor-Ort-Messungen im In- und Ausland zunehmend an Bedeutung gewinnt. Es wurde ein neuartiges Prinzip der Teilentladungsmessung realisiert. Damit sind eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten gegeben, die den Nutzungsumfang bekannter Geräte der Teilentladungsmeßtechnik weit überschreiten.
Arbeitsweise und Handhabung der Teilentladungssonde M 4202 und der im Lieferumfang enthaltenen Zusatzgeräte Kalibrator und Lichtempfänger sind in der Bedienungsanleitung [1] und in [2] beschrieben. Ziel dieses Beitrages ist die Information über Erkenntnisse hinsichtlich der Eigenschaften des Gerätes, die bei umfangreichen Untersuchungen und Erprobungen gewonnen wurden. Einige Grundsatzbetrachtungen zum Meßprinzip und zu den Kalibrierverfahren sollen zum tieferen Verständnis dieser neuartigen Meßtechnik beitragen.
Die hier angegebenen Meßwerte sind als Ergebnisse von Untersuchungen zu verstehen, die mit Einzelgeräten erzielt wurden. Die in den technischen Daten des Erzeugnisses Teilentladungssonde robotron M 4202 enthaltenen Angaben bleiben davon unberührt.

1. Ladungsmessung mit galvanischer Kopplung

Zur galvanischen Kopplung der TE-Sonde an das Meßobjekt stehen die Eingänge Meßelektrode (ME) und Adapterelektrode (AE) zur Verfügung. Der Eingang ME hat die höchste Empfindlichkeit und größte Bandbreite.
Das Eingangssignal wird unmittelbar der Verarbeitungseinheit zugeführt. Beim Eingang AE wird das Eingangssignal über eine spezielle Elektrodenanordnung, die einen Längskondensator bildet, der Verarbeitungseinheit zugeführt. Dieser Eingang hat eine geringere Empfindlichkeit als der Eingang ME. Weiterhin erfolgt durch das Hochpaßverhalten dieses Eingangs eine Frequenzbandbegrenzung und Unterdrückung von Störsignalen unter 100 kHz.
Die Gesamtanordnung der Einkoppelelektrode des Sondeneingangs ist so ausgebildet, daß eine optimale Störunterdrückung dann erreicht wird, wenn das Nutzsignal über die Adapterelektrode eingekoppelt wird. Der Eingang AE sollte deshalb der bevorzugte Meßeingang bei galvanischer Kopplung sein. Nur bei extrem schwachen TE-Signalen und gut überschaubaren Störverhältnissen wird der Eingang ME verwendet.

1.1. Empfindlichkeit und Meßbereichsgrenzen

Empfindlichkeit und Meßbereichsgrenzen der TE-Sonde können mit einem Meßaufbau nach Bild 1a) ermittelt werden. Die Dimensionierung der Elemente R_M und C_0 sichert einerseits die gemäß IEC (TGL 20625) vorgeschriebene Form der Prüfimpulse, der Widerstand von 50 Ω stellt gleichzeitig den Abschluß des BNC-Anschlußkabels in Größenordnung des Wellenwiderstandes sicher und gewährleistet eine annähernd reelle Belastung.
Durch die RC-Kombination fließen Stromimpulse der Form

$$I = \frac{U_0}{R_M} \exp(-t/\tau) \qquad (1)$$

Dipl.-Ing. *Helmut Franzke* ist Mitarbeiter in Forschung und Entwicklung, Dr.-Ing. *Eckard Geißler* ist Abteilungsleiter in Forschung und Entwicklung, Dr.-Ing. *Dietmar Krieger* ist Fachbereichsleiter in Forschung und Entwicklung des VEB Robotron-Meßelektronik „Otto Schön" Dresden.

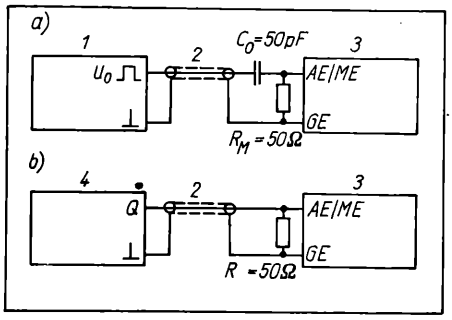


Bild 1
Anordnung zur Ladungsmessung bei galvanischer Kopplung
a) mit Impulsgenerator; b) mit Kalibrator
1 Impulsgenerator; 2 Koaxialkabel; 3 TE-Sonde; 4 Kalibrator

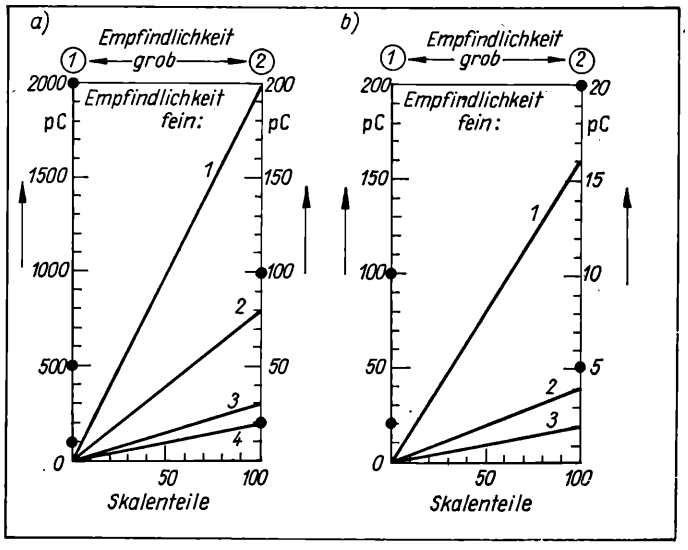


Bild 2. Sondenkennlinien
a) Eingang Adapterelektrode; b) Eingang Meßelektrode
o Ladungswerte des Kalibrators

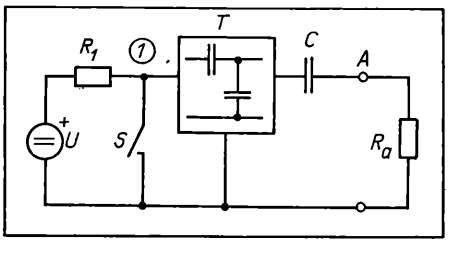


Bild3
Prinzipschaltung des Kalibrators

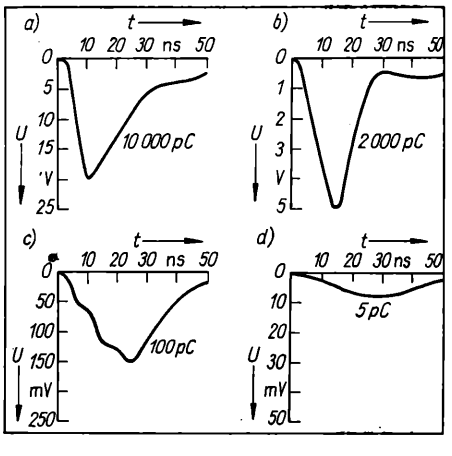


Bild 4
Ausgangsimpulse des Kalibrators

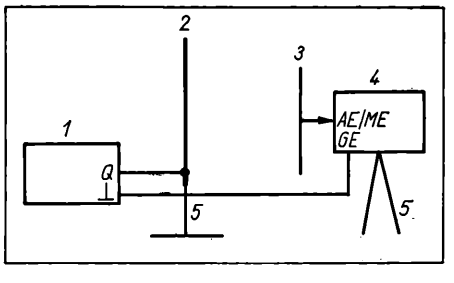


Bild 5
Anordnung zur Ladungsmessung mit Feldkopplung
1 Kalibrator; 2 Metallplatte 200 mm × 300 mm; 3 Zusatzplatte Dmr. 350 mm; 4 TE-Sonde; 5 Isolierständer

mit dem Ladungsinhalt

$$Q = \frac{U_0}{R_M}\tau = U_0 C_0 . \qquad (2)$$

Diese Impulse werden über den Widerstand R_M der Sonde als Eingangsspannung U_S zugeführt:

$$U_S = U_0 \exp(-t/\tau). \qquad (3)$$

In der Sonde erfolgt durch Integration die Anzeige einer der Ladung Q proportionalen Größe Q_A:

$$Q_A = K U_0 \tau, \qquad (4)$$

$$Q_A = K R_M Q. \qquad (5)$$

Der Faktor K wird vom Empfindlichkeitsschalter (grob) und Empfindlichkeitsregler (fein) der Sonde beeinflußt. Er ändert auch seinen Wert beim Übergang von der Adapter- zur Meßelektrode. Die eindeutige Zuordnung einer bestimmten Anzeige Q_A zu einer Ladungsmenge Q erfolgt durch das Kalibrieren. Gleichung (5) macht dabei deutlich, daß nach erfolgter Kalibrierung keine Veränderungen an der Sonde zulässig sind. Der Einfluß des Widerstandes R_M auf die Anzeige erfordert die Festlegung bestimmter Kalibrierschaltungen. Durch Verändern der Spannung U_0 des Impulsgenerators im Bild 1a) können gemäß (2) die Ladungswerte der Stromimpulse kontinuierlich verändert werden. Damit sind für festgelegte Einstellungen an der Sonde für die Meßschaltung nach Bild 1a) Kennlinien für die meßbaren Ladungswerte aufnehmbar. Derartige Kennlinien sind in den Bildern 2a) und 2b) dargestellt. Umfangreiche Detailmessungen hierzu werden in [3] dokumentiert. Folgende Eigenschaften der Sonde können für eine Meßanordnung entsprechend Bild 1a) aus Bild 2 abgelesen werden.

— Erreichbare Meßempfindlichkeit: etwa 1 pC
Dieser Wert gilt für Laborbedingungen, bei praktischen Messungen wird die Empfindlichkeitsschwelle vom Störabstand bestimmt.
— Meßbare Maximalladung für gegebene Anordnung: 2000 pC
— Empfindlichkeitsumschaltung (grob): Faktor 10 (20 dB)
— Empfindlichkeitsunterschied zwischen Meß- und Adapterelektrode: abhängig vom Feinregler, etwa Faktor 20 (26 dB), für Reglerstellung $\geqq 2$.

Mit dem zur Sonde gehörenden Kalibrator und dem mitgelieferten Meßwiderstand 50 Ω können mit einem Prüfaufbau nach Bild 1b) einzelne Kennlinien gemessen werden.
Die festen Ladungswerte des Kalibrators wurden in die Diagramme im Bild 2 eingetragen. Damit wird deutlich, daß die Festwerte des Kalibrators so gewählt wurden, daß im Meßbereich von 5 pC bis 2000 pC für jede mögliche Einstellung an der Sonde eine Kalibrierung mit dem Meßwiderstand von 50 Ω möglich ist. Diese Kalibrierungsmethode ist auf die Sondenmessung direkt zugeschnitten. Die Anwendung wird im Abschn. 5. beschrieben.

1.2. Eigenschaften des Kalibrators

Zur fehlerfreien Nutzung des Kalibrators ist die Kenntnis der Arbeitsweise des Geräts vorteilhaft. Die Prinzipschaltung ist im Bild 3 dargestellt. Über den hochohmigen Widerstand R_1 wird die nachfolgende Kondensatorenanordnung, die aus dem kapazitiven Teiler T und dem Längskondensator C besteht, aufgeladen. Wenn die Spannung am Punkt 1 einen bestimmten Wert U_0 erreicht hat, so schließt der elektronische Schalter S und erzeugt einen Kurzschluß am Punkt 1. Der entstehende Spannungssprung wird über das Netzwerk T geteilt und erscheint am jeweiligen Ausgang A des Kalibrators als negative Impulsflanke. Die Steilheit dieser Impulsflanke ist unabhängig vom Abschlußwiderstand R_a. Sie wird durch die innere Schaltung bestimmt und beträgt für den Ausgang 10000 pC etwa 10 ns. Mit zunehmender Teilung ist eine Verlängerung bis auf etwa 20 ns zu verzeichnen.
Die Entladung der Kondensatoren erfolgt über den Abschlußwiderstand R_a, der die Zeitkonstante der Entladekurve und somit die Breite der Kalibratorimpulse bestimmt. Bei einem Abschlußwiderstand von 50 Ω hat die Entladezeitkonstante einen Wert zwischen 20 und 30 ns für alle Ladungsausgänge des Kalibrators. Der Ladungsinhalt der abgegebenen Impulse ist mit (2) festgelegt und somit unabhängig von der Größe des Abschlußwiderstandes.
Beim praktischen Gebrauch des Kalibrators tritt immer der unmittelbar an den Ausgangsbuchsen wirkende Eingangswiderstand der angeschlossenen Meßschaltung als impulsformender Widerstand R_a in Erscheinung.
Hier ist besondere Aufmerksamkeit geboten, da besonders induktive Belastungen zu unerwünschten Resonanzeffekten und damit zur Verfälschung der abgegebenen Ladung führen können.

Tafel 1. Linearität bei Feldkopplung

Abstand mm	Sondeneingang	Mit/ohne Zusatzplatte	Empfindlichkeit grob	fein	Kalibrator pC	Meßwert Skt	Linearitätsfehler %
200	AE	ohne	2	3,9	500 100	100 21	5
600	AE	mit	1	3,2	500 100	100 19	5
200	AE	mit	2	4,6	20 5	100 28	11

Die Kalibratorausgänge sind kurzschlußfest. Im Kurzschlußfall wirkt ein innerer Schutzwiderstand. Es werden Stromimpulse abgegeben, deren Ladungsinhalt dem Wert des jeweiligen Ausgangs entspricht.
In den Bildern 4a) bis 4d) sind Originalimpulse des Kalibrators für verschiedene Ausgänge dargestellt. Dabei wurde der Kalibrator mit einem BNC-Meßkabel, das mit 50 Ω abgeschlossen wurde, an einen schnellen Speicheroszillografen angeschlossen.
Die Ladungsmenge der Impulse in den Bildern kann mit (2) kontrolliert werden. Für den Impuls im Bild 4a) gilt:

$$Q = \frac{U_0}{R_M}\tau = 10000\ \text{pC}$$

mit

$U_0 = 20\ \text{V}; R_M = 50\ \Omega; \tau = 25\ \text{ns}$

2. Ladungsmessung mit Feldkopplung

Der besondere Vorteil der TE-Sonde besteht darin, daß TE-Impulse auch ohne galvanische Verbindung zum Meßobjekt erfaßt werden können. Diese Eigenschaft wird von dem im Eingangsteil angeordneten Elektrodensystem, das entsprechende Platten für die Meß- und Adapterelektrode enthält, sichergestellt. Durch Verwendung einer externen Zusatzplatte, die auf die Sonde aufgesteckt wird und mit einem der Eingänge AE oder ME verbunden wird, kann die hohe Empfindlichkeit der Sonde noch gesteigert werden.
Die folgenden Ausführungen zeigen, daß für kleine Abstände zwischen Meßobjekt und Sonde eine kapazitive Signaleinkopplung erfolgt. Das bedeutet, Sondeneingang und Meßobjekt bilden eine Kapazität, deren Größe die auf den Sondeneingang gelangende Ladungsmenge bestimmt. Bei plattenförmiger Ausbildung des Meßobjekts kann bis zu Entfernungen von 1 m eine Abhängigkeit der erfaßten Ladung entsprechend der Kondensatorgleichung

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \qquad (6)$$

nachgewiesen werden.

2.1. Linearität bei Feldkopplung

Es wird ein Meßaufbau nach Bild 5 verwendet. Die Meßergebnisse für unterschiedliche Ansteuerbereiche der Sonde und unterschiedliche Entfernungen sind in Tafel 1 zusammengestellt. Die Linearität ist mit hinreichender Genauigkeit gegeben. Bei kleinen Ladungswerten sind Störeinflüsse zu bemerken, die einen Anstieg des Linearitätsfehlers bewirken.

Tafel 2. Empfindlichkeitszunahme durch Zusatzplatte

	Abstand mm	Sondeneingang	Empfindlichkeit grob	fein	Kalibrator pC	Meßwert Skt	Empfindlichkeitszunahme
Mit Platte	365	AE	1	3	500	100	
Ohne Platte	365	AE	2	3	500	33	
Empfindlichkeitsänderung			+ 20 dB			10 dB	30 dB
Mit Platte	365	AE	1	3	500	100	
Ohne Platte	365	AE	1	3	10000	74	
Empfindlichkeitsänderung					+ 26 dB	3 dB	30 dB

2.2. Empfindlichkeitserhöhung durch Zusatzplatte

Es wird wieder der Meßaufbau nach Bild 5 verwendet, als Zusatzplatte eine Scheibe mit dem Durchmesser von 350 mm benutzt und auf den Eingang AE gesteckt. Es tritt dabei eine Vergrößerung der wirksamen Fläche gegenüber der inneren Adapterelektrode um den Faktor 30 (30 dB) ein. Die Meßergebnisse für unterschiedliche Ladungswerte und unterschiedliche Sondeneinstellungen zeigt Tafel 2. Der Empfindlichkeitszuwachs von 30 dB entspricht der Vergrößerung der wirksamen Fläche und zeigt damit ein Verhalten gemäß (6).

2.3. Zusammenhang zwischen Meßabstand und Anzeige

Die Messungen erfolgen mit dem Meßaufbau nach Bild 5. Bild 6 zeigt die Meßergebnisse in doppeltlogarithmischer Darstellung. Sowohl mit als auch ohne Zusatzplatte ergeben sich fallende Geraden. Die Anzeige ist damit entsprechend (6) umgekehrt proportional zum Meßabstand. Abweichungen treten bei Entfernungen über 800 mm zwischen Meßobjekt und Sonde auf.

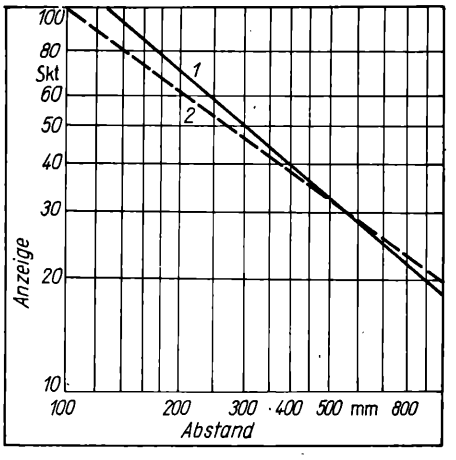


Bild 6
Abhängigkeit der Anzeige vom Meßabstand
1: Q = 500 pC, grob: 2, fein: 3, AE ohne Zusatzplatte
2: Q = 20 pC, grob: 1, fein: 4, AE mit Zusatzplatte

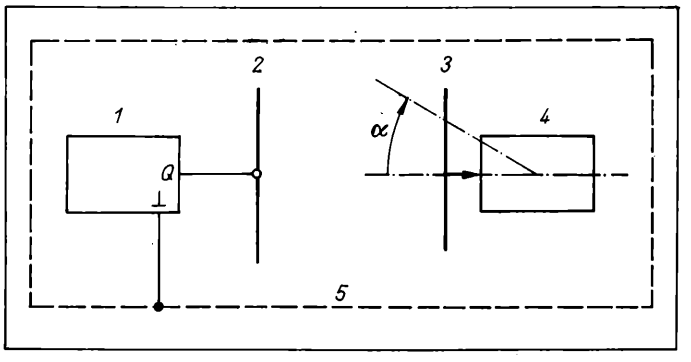
2.4. Richtwirkung der Sonde

Die Messung erfolgt bei potentialfreier Feldkopplung entsprechend der Anordnung im Bild 7. Der Meßaufbau befindet sich auf einer Aluminiumplatte, die mit der Masse des Kalibrators verbunden ist und das Bezugspotential für die Sonde über kapazitive Kopplung zum Gehäuse bildet.
Im Bild 8 sind die Meßergebnisse dargestellt. Jede Kurve ist auf den Anzeigewert bei Grundstellung der Sonde bezogen. Es ist zu erkennen, daß bei einem Winkel von 80° maximale Störunterdrükkung eintritt. Weiterhin wird deutlich, daß die Verwendung der Zusatzplatte neben der Empfindlichkeitserhöhung eine Verringerung der Richtwirkung zur Folge hat.

3. Frequenz-Zeitverhalten der Sonde

Die in die Sonde eingespeisten Impulse gelangen auf einen Eingangsverstärker und werden danach einem Integrator zugeführt. Der Integrator setzt die Ladung der Eingangsimpulse in Amplitudenwerte geformter, gleichgerichteter Impulse um. Sie werden

Bild 7. Anordnung zur Messung der Richtwirkung (Draufsicht)
1 Kalibrator; 2 Metallplatte 200 mm × 300 mm; 3 Zusatzplatte Dmr. 350 mm; 4 TE-Sonde; 5 Aluminiumplatte als Bezugspotential



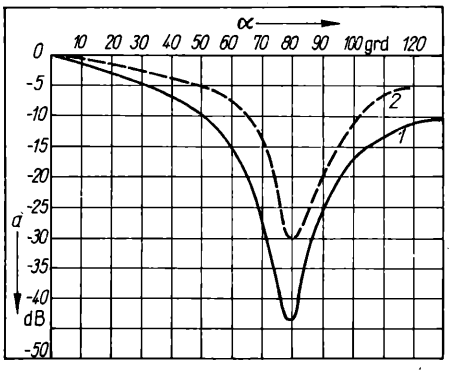
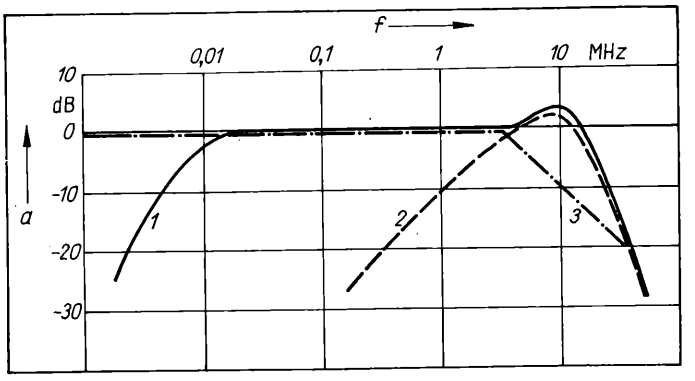


Bild 8
Richtwirkung der TE-Sonde
1: Q = 10000 pC, grob: 1, fein: 5, AE ohne Zusatzplatte, Abstand: 260 mm
2: Q = 2000 pC, grob: 1, fein: 5, AE mit Zusatzplatte, Abstand: 390 mm

Bild 9
Frequenzgänge des Eingangsverstärkers der TE-Sonde
1 Meßelektrode;
2 Adapterelektrode;
3 Spektrum einer abklingenden e-Funktion



ausgegeben, die der Ladung proportionale Amplitude wird über eine Spitzenwertmessung angezeigt.
Das Frequenzverhalten des Eingangsverstärkers bestimmt die Impulsverarbeitungseigenschaften der Sonde.
Bild 9 zeigt den Frequenzgang des Eingangsverstärkers für die Eingänge ME und AE. Die unterschiedlichen Eigenschaften beider Eingänge im Frequenzverhalten sind deutlich erkennbar.
Unter der Annahme, die Eingangsimpulse genügen einer e-Funktion, gilt für das Frequenzspektrum dieser Impulse ein linearer Abfall mit 20 dB/Dekade oberhalb der Grenzfrequenz:

$$f_g = \frac{1}{2\,\tau\,\pi}. \qquad (7)$$

Im Bild 9 wurde ein derartiges Amplitudenspektrum so eingezeichnet, daß die impulsbestimmenden Frequenzanteile im Übertragungsbereich des Eingangsverstärkers liegen. Es ist eine Grenzfrequenz von etwa 6 MHz ablesbar. Wie aus (7) hervorgeht, werden somit Eingangsimpulse mit Zeitkonstanten von mindestens 25 ns problemlos von der Sonde empfangen und verarbeitet. Dieser Wert entspricht völlig den in einschlägigen Untersuchungen ermittelten Kenngrößen realer TE-Impulse.

4. Vergleich der TE-Sondenmessung mit dem Standardprüfkreis

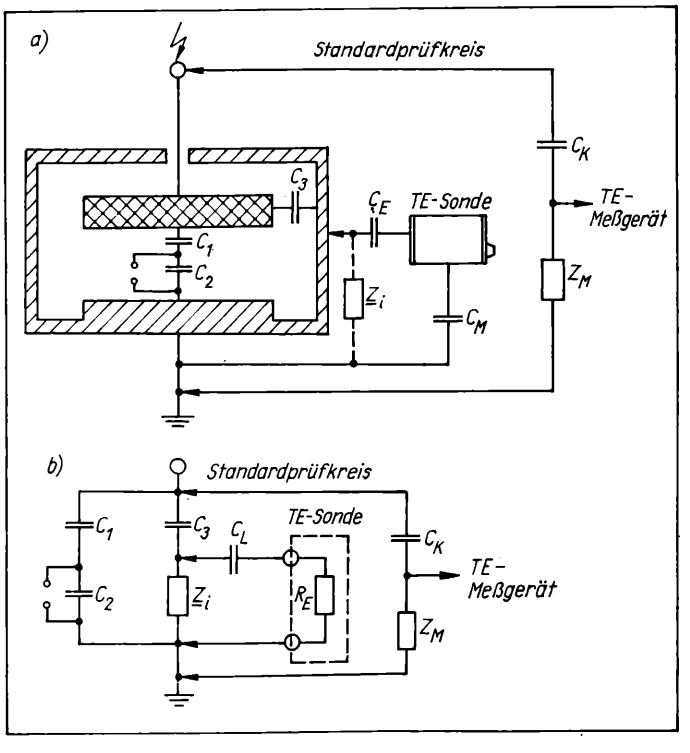
Das Prinzip der Sondenmessung beruht darauf, daß ein Teilentladungsvorgang im Inneren einer Hochspannungseinrichtung hochfrequente Impulssignale über innere Impedanzen nach außen koppelt. Geerdete Teile der Einrichtungen stellen für die im Megahertzbereich liegenden Anteile der TE-Impulse keinen Kurzschluß dar. Sie bilden eine komplexe Impedanz, über der entsprechende Spannungssignale entstehen. Sie erfaßt die hochempfindliche und breitbandige Sonde, wobei die in [1] und [2] vorgeschlagenen Ankoppelvarianten verwendet werden.
Beim Standardprüfkreis erfolgt die Auskopplung der TE-Signale über einen definierten und extra anzuschaltenden elektrischen Nebenschluß.
Im Bild 10a) sind die Übertragungsverhältnisse anschaulich und vereinfacht dargestellt, das Bild 10b) zeigt das Ersatzschaltbild und damit den Vergleich der elektrischen Verhältnisse. Die Kapazitäten C_1, C_2 und C_3 sind die Elemente des bekannten TE-Ersatzschaltbildes. Die Impedanz Z_i ist der für die TE-Impulse wirksame komplexe Widerstand zwischen Ankoppelpunkt der Sonde und Bezugspotential. Er wird vom Ankoppelpunkt sowie von den Gehäuse- und Erdungsverhältnissen beeinflußt und festgelegt.
Die Kapazität C_L wird von der Ankoppelart der Sonde bestimmt. Entsprechend Bild 10a) enthält C_L folgende Teilkapazitäten:

— Potentialfreie Feldkopplung: Reihenschaltung aus C_E und C_M
— Potentialbezogene Feldkopplung: C_E
— Einpolige galvanische Kopplung: C_M
— Zweipolige galvanische Kopplung: C_L galvanisch überbrückt.

Aus den bisherigen Betrachtungen können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Bei der Standardmessung erfolgt die Signalkopplung über den definierten Nebenschluß aus C_K und Z_M und ist bei jeder Messung gleich.
- Bei der Sondenmessung erfolgt die Signalauskopplung über die undefinierte komplexe Impedanz Z_i und zusätzlich über unbestimmte, ladungsbeeinflussende Kapazitäten C_3 und C_L und ist abhängig vom jeweiligen Meßort.
- Bei der Sondenmessung beeinflussen die Auskoppelelemente Z_i, C_3, C_L das Frequenzspektrum der von der Sonde erfaßten Impulse.
- Durch Integration des Eingangssignals in der Sonde wird die Fläche bewertet. Da bei Sondenmessung möglicherweise ein anderes Spektrum als bei Standardmessung ausgewertet wird, ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Meßwerten nicht unbedingt gegeben.
- Die Gemeinsamkeit beider Methoden besteht darin, daß das erfaßte Signal über die Ersatzschaltung nach Bild 10b) eindeutig der inneren TE-Quelle zugeordnet werden kann.
- Da alle Elemente der Ersatzschaltung nach Bild 10b) unbekannt sind, ist die Ermittlung der Größe der inneren Teilentladung bei beiden Methoden nicht möglich.
- Vergleichbarkeit und Bewertung einzelner Messungen werden über das Kalibrieren und den Begriff der scheinbaren Ladung erreicht.
- Die Sondenmessung ermöglicht wesentlich flexiblere und umfangreichere Messungen als die Standardmeßtechnik.
- Entscheidend für die Bewertung von Messungen an den einzelnen Objekten ist nicht allein der absolute Wert der ermittelten scheinbaren Ladung.
- Wichtig für die Zustandsbewertung elektrischer Betriebsmittel ist neben der Größe der gemessenen TE-Intensität die Bewertung der Eigenschaften der TE-Impulse wie Impulsdichte, Impulshäufigkeit, Amplituden- und Phasenverteilung relativ zur 50-Hz-Prüfspannung, Einsatz- und Aussetzspannung, Intensivitätsverteilung an unterschiedlichen Orten des Prüfobjekts usw.

Bild 10. Vergleich von Sondenmessung und Standardprüfkreis
a) Verhältnisse am Prüfobjekt; b) Ersatzschaltbild



• Bewertungsrichtlinien für Qualität und Gefährdungsgrad müssen für unterschiedliche Anlagen und Betriebsmittel einzeln und detailliert ermittelt werden. Auf diesem Gebiet laufen entsprechende Arbeiten, über deren Ergebnisse zu gegebener Zeit berichtet wird.

5. Kalibrierung bei TE-Sondenmessung

Der Begriff des Kalibrierens und mögliche Prozeduren für die Kalibrierung sind im IEC-Standard 270 (TGL 20625) festgelegt. Die Vorgaben beziehen sich auf den Standardprüfkreis und setzen die Abschaltbarkeit der Prüfspannung voraus.
In die Prüflingsklemmen werden Impulse mit bekannter Ladung eingespeist, die am TE-Meßgerät Meßwerte in vergleichbarer Größenordnung zu den Werten der TE-Messung selbst erzeugen. Die eingespeiste Ladungsmenge heißt scheinbare Ladung.
Zum Vergleich von Sondenmessungen an unterschiedlichen Orten eines Prüfobjekts oder zu unterschiedlichen Zeiten an einem festen Ort des Prüfobjekts müssen ebenfalls reproduzierbare Referenzwerte herstellbar sein.
Aus diesem Grunde wurden für die unterschiedlichen Methoden der Sondenmessung in [1] und [2] mögliche Kalibrierverfahren vorgeschlagen. Diese Verfahren sind in Tafel 3 zusammengestellt.
Die Meßergebnisse der einzelnen Methoden der Sondenmessung sind damit auf Ladungswerte zurückführbar. Es ist deshalb im allgemeinen nicht erforderlich, die bei der jeweiligen Sondenmessung vorliegende Empfindlichkeitseinstellung an der Sonde und den verwendeten Sondeneingang zu notieren. Festgehalten werden muß nur die Meßmethode nach Tafel 3 und der Wert der durch das Kalibrieren ermittelten Ladung.

Tafel 3. Kalibrierverfahren für Sondenmessung

Ankopplung der TE-Sonde	Kalibrierung: Hochspannung abschaltbar	Kalibrierung: Hochspannung nicht abschaltbar
Standardisierte Kopplung nach IEC 270		
Potentialfreie Feldkopplung	Modifizierte Kalibrierung der Meßanordnung	Direktkalibrierung mit Meßwiderstand
Potentialbezogene Feldkopplung		
Einpolige galvanische Kopplung		
Zweipolige galvanische Kopplung		Direktkalibrierung am Meßobjekt

Erläuterungen der Kalibriermethoden für TE-Sondenmessung gemäß Tafel 3:

— Standardisierte Kalibrierung nach IEC 270 (TGL 20625)

Diese Methode entspricht der in IEC 270 festgelegten Methode zur Ermittlung des Maßstabsfaktors K_c des kompletten Prüfaufbaus. Die Sonde arbeitet als TE-Meßgerät im Standardprüfkreis.

— Modifizierte Kalibrierung der Meßanordnung

Die Methode ist der standardisierten Kalibrierung ähnlich, da der komplette Prüfaufbau einbezogen wird.

Aus der Darstellung im Bild 10a) ist erkennbar, daß an unterschiedlichen Orten des Meßobjekts unterschiedliche elektrische Bedingungen vorliegen können und möglicherweise bei gleicher Kalibrierladung verschiedene Werte gemessen werden. Die Kalibrierung ist deshalb für den jeweiligen Meßort und konstante Meßbedingungen gültig.

— Direktkalibrierung mit Meßwiderstand

Mit dieser Methode werden Referenzwerte bei nichtabschaltbarer Prüfspannung geschaffen, die eine Vergleichbarkeit zeitlich unterschiedlicher Messungen an festen Meßpunkten des Prüfobjekts sichern.

Beispiel (Zahlenwerte siehe Abschn. 1.):

An einem festgelegten Meßpunkt eines Hochspannungstransformators werden im Abstand von 3 Monaten zwei Messungen durchgeführt.
Die Sonde wird einpolig angekoppelt.

• Messung 1

Meßelektrode, Empfindlichkeit: grob 2, fein 1, 30 Skalenteile
Direktkalibrierung bei unveränderter Sondeneinstellung: 5 pC für gleichen Ausschlag.

• Messung 2

Adapterelektrode, Empfindlichkeit: grob 2, fein 2, 62 Skalenteile
Direktkalibrierung für diese Sondeneinstellung:
25 Skalenteile bei 20 pC, das heißt, der Ausschlag von 62 Skalenteilen entspricht 50 pC
Nur mit der Kalibrierung wird erkannt, daß der TE-Pegel bei der zweiten Messung um den Faktor 10 höher als bei der ersten Messung liegt.
Die Direktkalibrierung ist gültig, solange die jeweilige Ankoppelart und der Meßpunkt am Meßobjekt nicht verändert werden.

— Direktkalibrierung am Meßobjekt

Diese Methode ist für die zweipolige galvanische Kopplung der Sonde geeignet. Die Kalibrierimpulse werden mit sehr kurzen Leitungen direkt in die Meßpunkte der Sonde eingespeist.
Eine Beobachtung der Ausgangssignale mit dem Oszillografen ist erforderlich, um eine Trennung der Kalibrierimpulse von den ebenfalls anliegenden TE-Impulsen zu sichern.
Die Kalibrierung erfolgt so, daß sich eine deutliche Zunahme der Anzeige bei Anschalten des Kalibrators ergibt. Diese Anzeige ist dann dem Kalibrierwert zuzuordnen, die scheinbare Ladung ohne Kalibrator wird aus der entsprechenden Skalenanzeige linear ausgerechnet.

6. Zusammenfassung

Es werden technische Eigenschaften der Teilentladungssonde robotron M 4202 beschrieben sowie einige grundlegende Betrachtungen zur Wirkungsweise und Anwendung dieses neuartigen Verfahrens der Teilentladungsmessung angestellt. Die Ergebnisse entstanden bei umfangreichen Untersuchungen und Erprobungen, die mit der TE-Sonde erfolgten. Weiterhin lieferten die vielen Diskussionen und Kontakte mit den Anwendern dieser neuen Meßtechnik ebenfalls wichtige Aussagen. Es sei deshalb an dieser Stelle allen gedankt, die mit eigenen Untersuchungen, Meßergebnissen, Hinweisen und Kritiken zur umfassenden Anwendung der TE-Sondenmeßtechnik beitragen.

Literatur

[1] Teilentladungssonde robotron M 4202; Technische Beschreibung und Bedienungsanleitung. VEB Robotron-Meßelektronik „Otto Schön" Dresden 1988
[2] *Lemke, E.:* Teilentladungs-Sondenmeßtechnik. Applikationsschrift des VEB Robotron-Meßelektronik „Otto Schön" Dresden 1989
[3] *Oesterheld, J.:* Teilentladungs-Sonden-Messungen in Schaltstellen. Belegarbeit. Kombinat VEB Chemische Werke Buna, Schkopau und TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, Bereich Hochspannungstechnik 1989

EA 6073

Vergleich der Berechnung eines großen Transformators mit der MFE mit Elementen 0. und höherer Ordnung

K. Komeza; G. Krusz; S. Wiak; Lodz, VR Polen

Für die Berechnung des elektromagnetischen Feldes eines Transformators ist die Methode der finiten Elemente üblich. Sie ist das weitaus verbreitetste numerische Näherungsverfahren zur Lösung der Randwertaufgaben.
Am häufigsten werden lineare Polynome als Ansatzfunktionen und dreieckige Elemente verwendet. Weiterhin ist es möglich, nur durch Verfeinerung der Elementmasche und folglich durch die Erhöhung der Anzahl der Elemente, Knoten und Unbekannte die numerische Rechengenauigkeit zu erhöhen. Allerdings sind die Preprocessingkosten sowie die Berechnungskosten sehr hoch. Gleichzeitig ist ein großer Speicherbedarf für die Dimensionen und Eigenschaften der Elemente notwendig. Das führt zu den Schwierigkeiten bei Verwendung von Personalcomputern.
Um diese Probleme zu vermeiden, kann man zwei verschiedene Wege gehen. Einerseits ist es möglich, die automatische Netzgeneration vorzubereiten, andererseits kann man Elemente höherer Ordnung benutzen.
Im folgenden werden Resultate der Streufeldberechnung in einem 520-MVA-Transformator dargestellt. Vorzugsweise wird der Einfluß des Grades der benutzten Hermiteschen Interpolationspolynome analysiert.

1. Mathematisches Modell zur Streufeldberechnung des Transformators

Für Magnetfeldberechnungen werden hauptsächlich das magnetische Vektorpotential $\vec{A}$, das durch

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \tag{1}$$

definiert ist sowie das skalare elektrische Potential V benutzt. Weiterhin soll das elektromagnetische Feld eines Transformators mit den partiellen Maxwellschen Differentialgleichungen,

$$\operatorname{grad}\left(\frac{1}{\mu}\right) + \operatorname{rot}\vec{A} - \frac{1}{\mu}\nabla^2\vec{A} = -\gamma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + \vec{J}_0 \tag{2}$$

$$-\nabla^2 V + \gamma\mu\frac{\partial V}{\partial t} = 0, \tag{3}$$

mit der Zusatzbedingung von *Lorenz*,

$$\operatorname{div}\vec{A} = \gamma\mu V, \tag{4}$$

bestimmt werden.
Die dreidimensionale numerische Simulation physikalischer Vorgänge, die sich in einem Transformator abspielen, ist leider wegen der komplizierten Form des Objekts sowie des nichtlinearen Zusammenhangs der Feldgrößen in den Ferromagnetika sehr zeitraubend und kostspielig. Deshalb beschränkt man sich auf die Analyse eines ebenen Feldproblems.
Das quasistationäre Vektorpotential hat dann nur die einzige nichtverschwindende Komponente

$$\vec{A} = \vec{1}_z \hat{A} \sin(\omega t + \varphi_A), \tag{5}$$

die als eine komplexe Größe dargestellt werden kann:

$$A_m = \hat{A} \exp(j\varphi_A). \tag{6}$$

Dr. sc. techn. *Krzysztof Komeza*, Dr. sc. techn. *Grazyna Krusz* und Dr. sc. techn. *Slawomir Wiak* sind Adjunkten am Institut für Elektrische Maschinen und Transformatoren der Technischen Universität Lodz (VR Polen)

Aufgrund der obigen vereinfachenden Annahmen ist es möglich, die Differentialgleichungen (2), (3) in kartesischen Koordinaten als inhomogene elliptische Gleichung

$$-\frac{\partial\left(\frac{1}{\mu}\right)\partial A_m}{\partial x\,\partial x} - \frac{\partial\left(\frac{1}{\mu}\right)\partial A_m}{\partial y\,\partial y} - \frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 A_m}{\partial x^2} - \frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 A_m}{\partial y^2} + j\omega A_m = J_m \tag{7}$$

mit nichtlinearen Koeffizienten in einem zweidimensionalen Gebiet $\Omega \in R^2$, das von einer gegebenen Randkurve $\Gamma_1 + \Gamma_2$ umgrenzt ist, darzustellen.
Von den möglichen Randbedingungen seien hier nur das homogene Neumannproblem:

$$\frac{\partial A_m}{\partial n} = 0 \qquad (x, y) \in \Gamma_1 \tag{8}$$

für die seitliche Randlinie Γ_1, die geometrische Symmetrie abbildet, oder das homogene Dirichletproblem:

$$A_m = 0 \qquad (x, y) \in \Gamma_2 \tag{9}$$

entlang des Γ_2-Teils des Randes genannt.
Nachfolgend wird eine verallgemeinernde Lösung dieses Problems im Sobolevschen Raum $H_0^1(\Omega)$ gesucht, d.h. eine Funktion $A \in H_0^1(\Omega)$, die folgender Gleichung genügt:

$$\int_\Omega \left[\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial A}{\partial x}\frac{\partial \psi^*}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y}\frac{\partial \psi^*}{\partial y}\right) + j\omega\gamma A\psi^*\right] d\Omega = \int_\Omega J_m \psi^* d\Omega, \tag{10}$$

wobei $\psi \in H_0^1(\Omega)$ eine beliebige Funktion ist.

2. Hermitesche Ansatzfunktionen

Nach der Methode der finiten Elemente wird das untersuchte zweidimensionale Gebiet Ω in dreieckige und viereckige Elemente unterteilt. Gegenüber der klassischen Lagrangeschen, die vollständige Polynome als Ansatzfunktionen benutzende Methode werden im folgenden die Hermiteschen Elemente verwendet.
In den sogenannten dimensionslosen lokalen Koordinaten mit Wertebereichen $0 \leqq \xi \leqq 1$, $0 \leqq \eta \leqq 1$ gelten folgende Bedingungen für die Hermiteschen Ansatzfunktionen:

$$\overset{p}{H}{}_{mn}^{(i,j)}(\xi) = \frac{\partial^{i+j}}{\partial\xi^i\,\partial\eta^j}\left[\overset{q}{H}_{mn}(\xi, \eta)\right] = \begin{cases} 0 \text{ für } (\xi, \eta) = (0,1), (1,0), (1,1) \\ \delta_m{}^i\,\delta_n{}^j \text{ für } (\xi, \eta) = (0,0). \end{cases} \tag{11}$$

$\partial_n{}^j$ Kroneckersymbol.

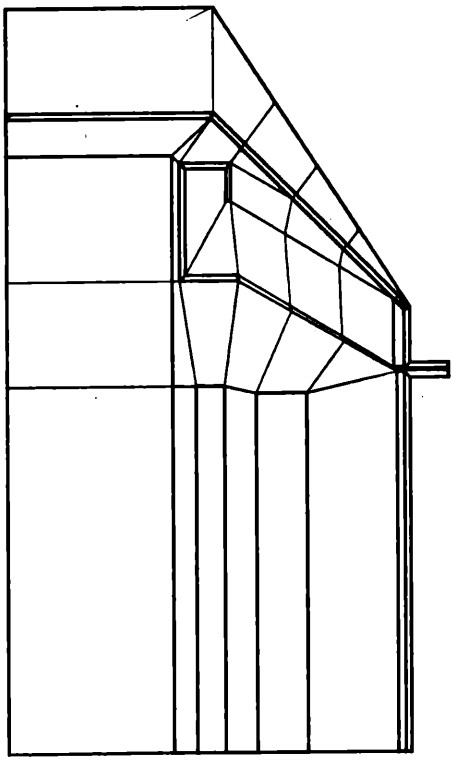


Bild 1
Gitternetz zur Streufeldberechnung in einem Transformator auf der Basis der Hermiteschen Elemente

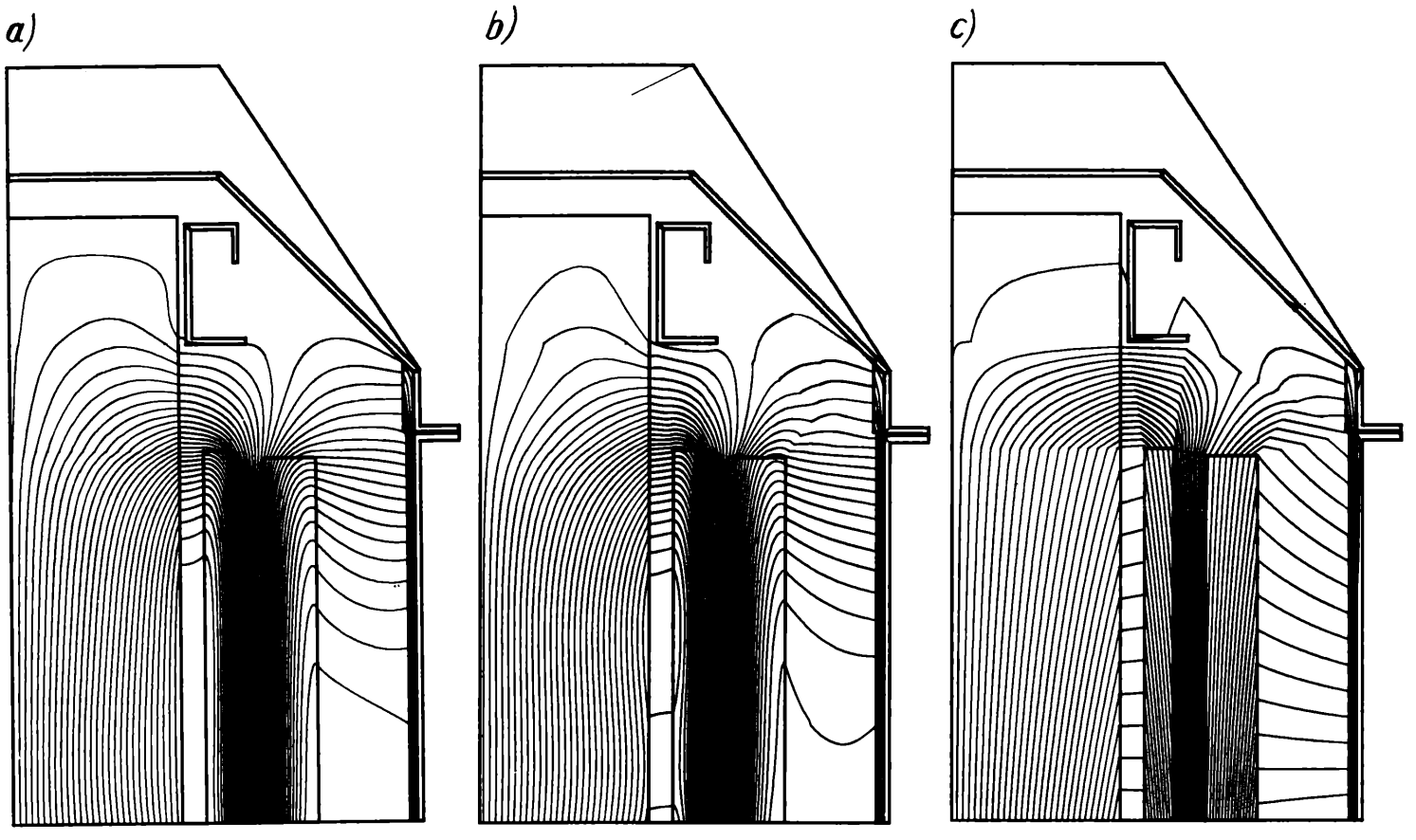


Bild 2. Mit Elementen dritter (a), zweiter (b) und erster (c) Ordnung berechnetes Streufeld eines Transformators

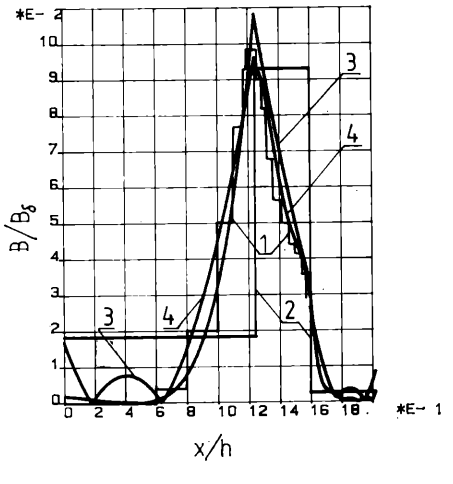


Bild 3. Normalkomponente der Induktion am Kern
1 6720 Elemente 0. Ordnung; 2 57 Elemente 0. Ordnung; 3 57 Hermitesche Elemente 1. Ordnung; 4 57 Hermitesche Elemente 2. Ordnung

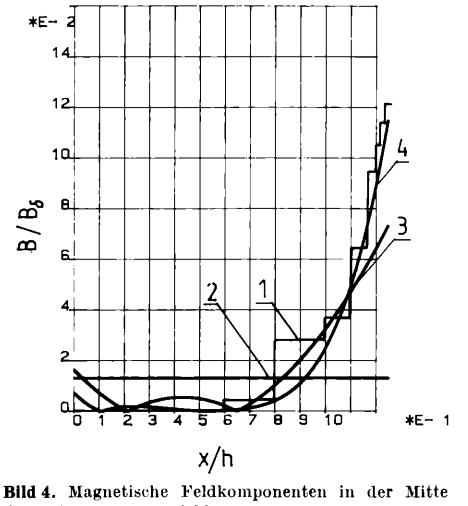
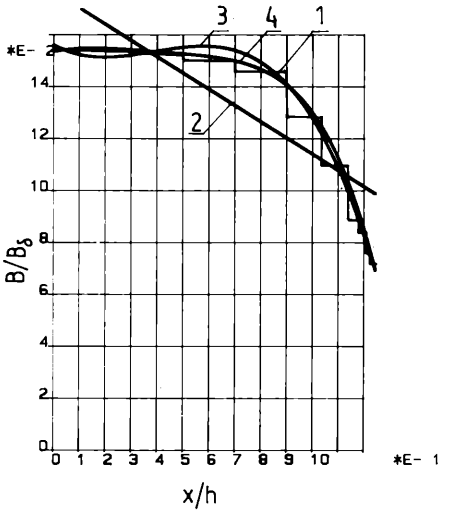


Bild 4. Magnetische Feldkomponenten in der Mitte der Unterspannungswicklung
a) Radialkomponente der Induktion;



b) Axialkomponente der Induktion

In einem zweidimensionalen Gebiet Ω können die Interpolationspolynome wie folgt geschrieben werden:

$$\overset{p}{H}_{\mathrm{mn}}(\xi,\eta) = \sum_{q=0}^{p} \left[\overset{q}{H}_{\mathrm{m}}(\xi) - \overset{q-1}{H}_{\mathrm{m}}(\xi)\right] \overset{p-q}{H}_{\mathrm{n}}(\eta)\,. \tag{12}$$

Dabei lassen sich die Polynome einer Veränderlichen aus

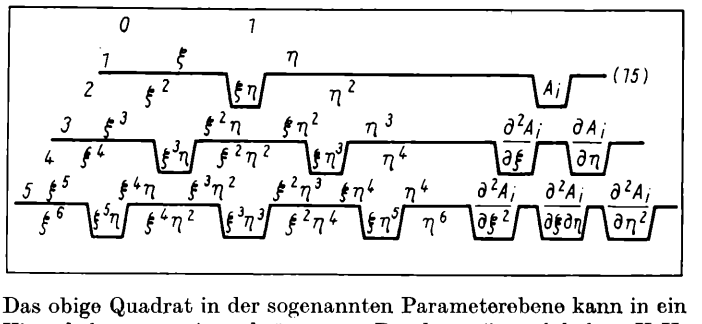
$$\overset{p}{H}_{\mathrm{n}}(\xi) = (1-\xi)^{p+1} \sum_{k=0}^{p} \left(c_{\mathrm{kn}} \frac{\xi^k}{k!}\right) \tag{13}$$

sofort bestimmen und die Parameter c_{kn} können wie folgt angegeben werden:

$$c_{\mathrm{kn}} = \frac{(p-n+k)!}{p!} \binom{k}{n}. \tag{14}$$

Nachfolgend sind die benutzten Interpolationspolynome für das Quadrat mit den Ecken (0,0), (0,1), (1,1), (1,0) gezeigt [Gl. (15), rechte Spalte].

Es ist zu erkennen, daß als Ansatzfunktionen vollständige Polynome $2p+1$. Grades mit einigen zusätzlichen, durch die Anzahl der Unbekannten festgelegten Gliedern verwendet werden.



Das obige Quadrat in der sogenannten Parameterebene kann in ein Viereckelement mit gekrümmten Rändern (im globalen X-Y-Koordinatensystem) übergeführt werden. Dadurch ist es möglich, alle Konstruktionsteile sehr genau abzubilden.

Unter den Vorteilen der Elemente höherer Ordnung ist vor allem die gute Genauigkeit zu erwähnen. Die Konvergenz dieser Methode steigt bei Vergrößerung des Polynomialgrades exponential.

Um dieselbe technisch benötigte Genauigkeit zu erreichen, kann man

anfangs weniger Elemente höherer Ordnung verwenden, was ein relativ günstiges Preprocessing ermöglicht.
Außer der gewöhnlichen Kontinuität des Vektorpotential sichern die Polynome höheren Grades noch die Stetigkeit beider ersten partiellen Ableitungen, d.h. der Induktionskomponenten. So nähert man sich dem physikalischen Bild des Feldes. Elemente mit Hermiteschen Interpolationspolynomen haben noch zusätzlichen Nutzen. Ihr Grad ist nicht mit einem einzelnen Element, sondern mit jedem Eckknoten zu assoziieren.
Bei Transformation der ersten partiellen Ableitungen im lokalen ξ-n-Koordinatensystem werden unnötige Unbekannte eliminiert, z.B. werden beim Polynom dritten Grades für primäre Unbekannte in einem Knoten auf drei reduziert. Der Rechenaufwand sinkt dann auf nur 22 % der ursprünglichen Kosten.

3. Magnetfeldberechnung des Transformators auf der Basis der Hermiteschen Elemente höherer Ordnung

Im folgenden werden die Resultate der Feldberechnung für Kurzschlußbetrieb des für Nachrechnung genutzten 520-MVA-Transformator nach der „klassischen" Methode mit linearen Ansatzfunktionen und dreieckigen Elementen im Vergleich mit Hermiteschen Interpolationspolynomen verschiedener Grade gezeigt. Bei der Hermiteschen Methode ist der berechnete Feldausschnitt in 57 dreieckige und viereckige Elemente geteilt (Bild 1).

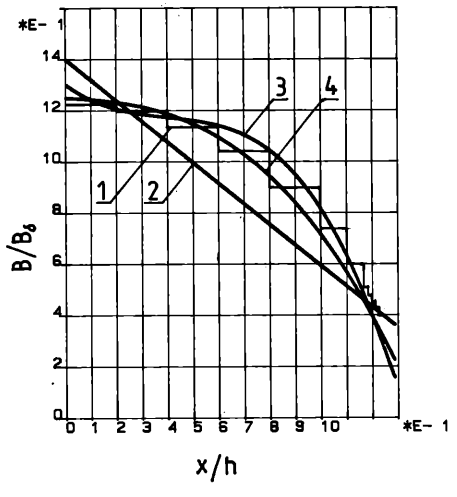


Bild 5
Flußdichte in der magnetischen Kesselabschirmung

Bild 2 zeigt die mit Polynomen verschiedener Grade erzielte Feldlinienverteilung. Es ist zu erkennen, daß nur die Verwendung der Interpolationsfunktionen fünften Grades ausreichend glatte und sprunglose Linien an den Elementrändern sichert. Die Polynome ersten Grades geben ungenügende Ergebnisse, doch zunächst erscheinen keine großen Unterschiede. Erst die Analyse der Induktionskomponente hebt Differenzen hervor.
In den Bildern 3 bis 5 werden die Hermiteschen Berechnungsresultate mit denen nach der klassischen Methode verglichen. Bei den linearen Ansatzfunktionen und Dreiecken wird der berechnete Feldausschnitt in 6720 Elemente unterteilt. Die Ergebnisse sind in relativen Einheiten dargestellt. Bezugswerte sind die maximale Induktion des Spaltstreuflusses B_δ für die Induktion und die mittlere Wicklungshöhe h für die linearen Dimensionen.
Die vorgestellten Resultate ermöglichen die Elemente höherer Ordnung mit Hermiteschen Interpolationspolynomen für besonders leistungsfähig einzuschätzen. Die Vorbereitung des Programmsystems ist in diesem Fall leider kompliziert und zeitraubend.

Literatur

[1] *Hoppe, V.:* Higher Order Polynomial Elements with Isoparametric Mapping. Int. J. Num. Meth. in Engng. 15 (1980), S. 1747
[2] *Komeza, K.; Hoppe, V.; Lassota, S.:* Hierarchial, Hermitian Finite Elements in Electric and Magnetic Field Computation. Int. Symp. on Electromagnetic Fields in Electric Engineering. ISEF 85, Warschau (1985), S. 81
[3] *Komeza, K.; Krusz, G.:* Berechnung des Einflusses der Wirbelstromreaktionen auf die Streufeldverteilung nach der Methode der Finiten Elemente (polnisch). Rosprawy Elektrotechniczne 32 (1986) 3, S. 785
[4] *Roseburg, D.; Körting, R.:* Einsatz von Kleinrechnern zur Numerischen Streufeldberechnungen in Großtransformatoren. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 10, S. 374
[5] *Silvester, P.; Konrad, A.:* Analysis of Transformer Leakage Phenomena by High-Order Finite Elements. IEEE Trans. PAS-92 (1973) 6, S. 1843
[6] *Strang, G.; Fix, G. J.:* An Analysis of the Finite Element Method. New York: Prentice-Hall 1973

EA 6071

Programmpaket FELD 88 zur Berechnung magnetischer Felder mit leistungsfähigem Iterationsverfahren

E. Thiem, KDT, Karl-Marx-Stadt

Die genaue Berechnung elektromagnetischer Felder erlangt in der Elektrotechnik, insbesondere in der Energietechnik, eine immer größere Bedeutung. Die erhöhten Anforderungen an elektrotechnische Erzeugnisse erfordern als leistungsfähiges Hilfsmittel für die Dimensionierung den Einsatz numerischer Verfahren. Der rechnergestützte Entwurf magnetischer Kreise ist ein Weg sowohl zur Erhöhung der Effektivität der Ingenieurtätigkeit als auch zur Verringerung der Kosten durch sparsamsten Material- bzw. Energieverbrauch. Durch Optimierung auf dem Rechner kann der kostspielige und zeitaufwendige Musterbau wesentlich reduziert werden.
Das an der Sektion Automatisierungstechnik der TU Karl-Marx-Stadt entwickelte Programmpaket FELD 88 dient der numerischen Berechnung zweidimensionaler stationärer Magnetfelder. Es bildet somit die Grundlage für die Dimensionierung elektro-magnetischer Energiewandler.
Die Lösung der Differentialgleichung des stationären Magnetfeldes (1) erfolgt auf der Basis eines Finiten Differenzenverfahrens:

$$\mathrm{rot}\left(\frac{1}{\mu}\,\mathrm{rot}\,\vec{A}\right) = -\varkappa\,\mathrm{grad}\,\varphi + \frac{1}{\mu}\,\mathrm{rot}\,\vec{J}. \qquad (1)$$

Die betrachteten Magnetkreiskonfigurationen können dabei wahlweise in Polarkoordinaten oder kartesischen Koordinaten diskretisiert werden. Die maximale Feinheit der Diskretisierung betrug bisher 3000 Gitterpunkte und die benötigte Rechenzeit lag bei 40 min. Durch Einsatz eines effektiven Lösungsverfahrens, auf das im Abschn. 1.3. näher eingegangen wird, konnte eine wesentliche Reduzierung der Rechenzeit (um 80 %) sowie eine Erhöhung der Gitterpunktzahl (auf 12000) erreicht werden.
Zur Anwendung von FELD 88 ist ein ESER-Rechner mit mindestens 250 kBytes Programmspeicherbereich, dem Betriebssystem OS/ES und Magnetbandperipherie erforderlich. Das Programmpaket FELD 88 ist in FORTRAN IV geschrieben.

1. Programmkomponenten des Programmpaketes FELD 88

1.1. Allgemeiner Überblick

Im Bild 1 ist der Strukturplan der Programmkomponenten des Programmpakets FELD 88 abgebildet.
Das Eingabekonzept ermöglicht wahlweise eine interaktive oder Stapeldatei-Eingabe (INDAT, STADAT). Es schließt sich die Komponente FDM des Programmsystems an. Hier erfolgt die Lösung des diskretisierten Gleichungssystems. Als Ergebnis erhält man eine diskrete Verteilung des magnetischen Vektorpotentials, aus der in der Komponente ERG die integralen Größen, z.B. Induktionsverteilungen, magnetischer Fluß und Streufluß, Wicklungsinduktivitäten, Kräfteverteilungen und Drehmomente, berechnet werden. Die beiden Grafikkomponenten realisieren die Darstellung der berechneten Größen.

1.2. Dateneingabe

Die Erzeugung des Gitternetzes und der Eigenschaftswerte der Diskretisierungsflächen erfolgt in dem für jede Geometrie neu zu erstellenden Unterprogramm DATEN. Ein Unterprogramm DISTIN ermöglicht dabei die formatfreie Eingabe der Gitterweiten mit umfassenden Vervielfachungsmöglichkeiten.

1.3. Programmkomponente FDM

Diese Programmkomponente ermöglicht die numerische Ermittlung des magnetischen Vektorpotentials. Das aus (1) durch An-

Dr.-Ing. *Elfi Thiem* ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Sektion Automatisierungstechnik der TU Karl-Marx-Stadt.

wendung der Methode der Finiten Differenzen gewonnene Gleichungssystem (2) wird iterativ gelöst:

$$CA = F. \tag{2}$$

Dabei erfolgt die Korrektur der nichtlinearen Materialeigenschaften. Es können bis zu drei verschiedene Materialien berücksichtigt werden. Bisher wurde als Iterationsverfahren das Gauß-Seidel-Verfahren verwendet. Durch den Einsatz des von der Sektion Mathematik der TU Karl-Marx-Stadt entwickelten Iterationsverfahrens nach der Methode der Konjugierten Gradienten (UP SOLKLZ) konnten erhebliche Vorteile erzielt werden.
Beim Verfahren der Konjugierten Gradienten erfolgt die Berücksichtigung der Nichtlinearität von Eisenteilen und Dauermagneten mit einem Mehrschichtiterationsverfahren entsprechend (3):

$$C_{n+1}\frac{A_{n+1}-A_n}{\tau} + C_n A_n = F_{n+1}. \tag{3}$$

Dabei ist τ ein Unterrelaxationsfaktor, der maßgeblich die Stabilität und die Konvergenzgeschwindigkeit des Verfahrens beeinflußt. Er kann vom Anwender verändert werden. Beim Iterationsverfahren nach der Methode der Konjugierten Gradienten wird die Koeffizientenmatrix C vorkonditioniert. Als Vorteile dieses Iterationsverfahrens sind zu nennen:

— keine Vektorpotentialvorgabe als Startwert notwendig
— keine Vektorpotentialerhöhung mit systematischer Überrelaxation
— keine Konvergenzbeschleunigung mit Hilfe eines physikalischen Kriteriums (Durchflutungssatz)
— Anzahl der Knoten erhöhte sich von 3000 auf 12000
— wesentliche Reduzierung der Rechenzeit (auf 20%).

Sowohl durch die erhebliche Erhöhung der Gitterpunktanzahl als auch durch die Verkürzung der Rechenzeit ist die Voraussetzung geschaffen sehr komplizierte Magnetkreisgeometrien zu berechnen.
Die Reduzierung der Rechenzeit des Iterationsvorgangs ist im wesentlichen auf die Vorkonditionierung des Gleichungssystems zurückzuführen. In der Komponente FDM sind folgende drei Vorkonditionierungsmethoden enthalten:

1. Unvollständige Cholesky-Zerlegung,
2. Modifizierte Cholesky-Zerlegung,
3. Modifizierte alternierende Dreieckszerlegung.

Die Effektivität der beiden Verfahren soll anhand der nachfolgenden Bilder gezeigt werden. Die Berechnungen wurden für eine Gleichstrommaschine MBC 200 und für eine Asynchronmaschine durchgeführt. Ein entsprechender Ausschnitt aus dem Originalquerschnitt der Gleichstrommaschine liefert Bild 2a). Er wurde mit einem Gitternetz von 3000 Gitterpunkten überzogen. Im Bild 2b) ist die magnetische Induktion im Zahn des Läufers (Prüfpunkt) als Funktion der Rechenzeit aufgetragen, um das Konvergenzverhalten der Iterationsverfahren bei 3000 Gitterpunkten zu demonstrieren.
Es ist ersichtlich, daß das früher verwendete Gauß-Seidel-Iterationsverfahren eine Rechenzeit von mehr als 25 min benötigt. Dagegen erhält man mit dem Verfahren der Konjugierten Gradienten eine wesentliche Rechenzeitreduzierung. Bei Anwendung der Unvollständigen Cholesky-Zerlegung ist eine Rechenzeitreduzierung auf 50%, bei der Modifizierten Cholesky-Zerlegung auf 30% und bei der Modifizierten alternierenden Dreieckzerlegung sogar auf 20% zu verzeichnen. Die Rechenzeit liegt dementsprechend bei 5 bis 15 min. Durch die erhebliche Rechenzeitverkürzung wurde eine wesentliche Voraussetzung für die Eingliederung des Programmpaketes FELD 88 als CAD-Element in den rechnergestützten Entwurf elektrischer Antriebe geschaffen.
Eine Aussage zur benötigten Rechenzeit in Abhängigkeit der Gitterpunktanzahl bei Anwendung des Verfahrens der Konjugierten Gradienten mit alternierender Dreieckszerlegung als Vorkonditionierungsmethode ist in Tafel 1 enthalten. Diese Werte wurden anhand der im Abschn. 2 berechneten Asynchronmaschine ermittelt.
Zur Abarbeitung der Programmkomponente FDM ist ein Hauptspeicherplatz in Abhängigkeit der Gitterpunktanzahl von 250 bis 2000 kByte erforderlich.

1.4. Programmkomponente ERG

Zur Auswertung der von FDM ermittelten Vektorpotentialverteilung im Hinblick auf die für den Entwurf elektromagnetischer Energiewandler notwendigen integralen Größen dient die Programmkomponente ERG. Die Eingabedaten bezieht die Komponente

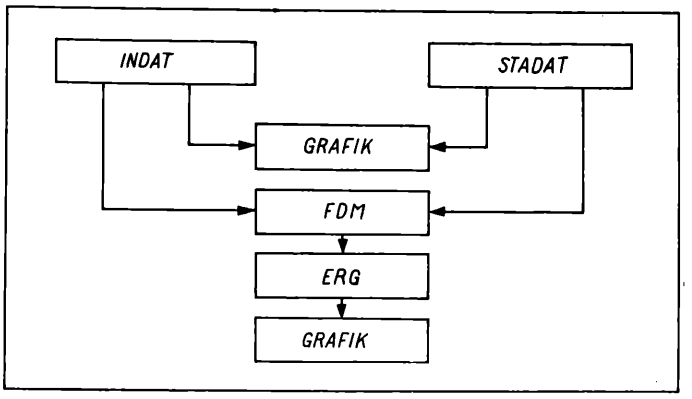
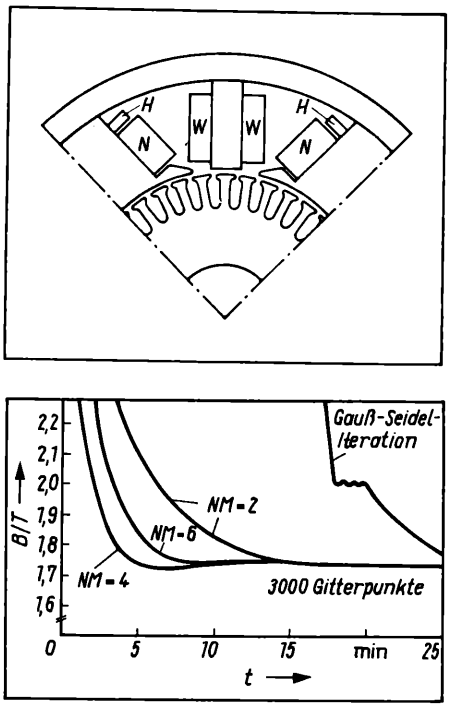


Bild 1. Strukturplan des Programmpaketes FELD 88

Bild 2
Gleichstrommaschine
a) Originalgeometrie der Gleichstrommaschine MBC 200
H Hilfsreihenschlußwicklung
N Nebenschlußwicklung
W Wendepolwicklung
b) Konvergenzverhalten der magnetischen Induktion im Prüfpunkt bei verschiedenen Iterationsverfahren
Verfahren der konjugierten Gradienten (UP SOLKLZ)
NM = 2: Unvollständige Cholesky-Zerlegung
NM = 6: Modifizierte Cholesky-Zerlegung
NM = 4: Modifizierte alternierende Dreieckszerlegung



Tafel 1. Abhängigkeit der Rechenzeit von der Gitterpunktanzahl

Gitterpunktanzahl	benötigte Rechenzeit bis zur Konvergenz der Lösung ($\varepsilon = 10^{-5}$)	
	Konjugierte Gradienten mit alternierender Dreieckszerlegung	Gauß-Seidel
600	0,5 min	
3000	5 min	35 min
6000	25 min	
12000	70 min	

ERG über magnetische Datenträger von dem Programm FDM, wobei über zusätzliche Steuerdaten der Leistungsumfang von ERG modifiziert werden kann. Zur Abarbeitung dieses Programms werden etwa 250 kByte Hauptspeicherplatz benötigt. Die Rechenzeit des Programms liegt bei Nutzung aller Auswertefunktionen bei 3 bis 6 min. Es werden folgende Größen ermittelt:

— das Feldbild
— die magnetische Induktion
— die Induktivitäten
— der Streu- und Nutzfluß
— Kräfte und Drehmomente.

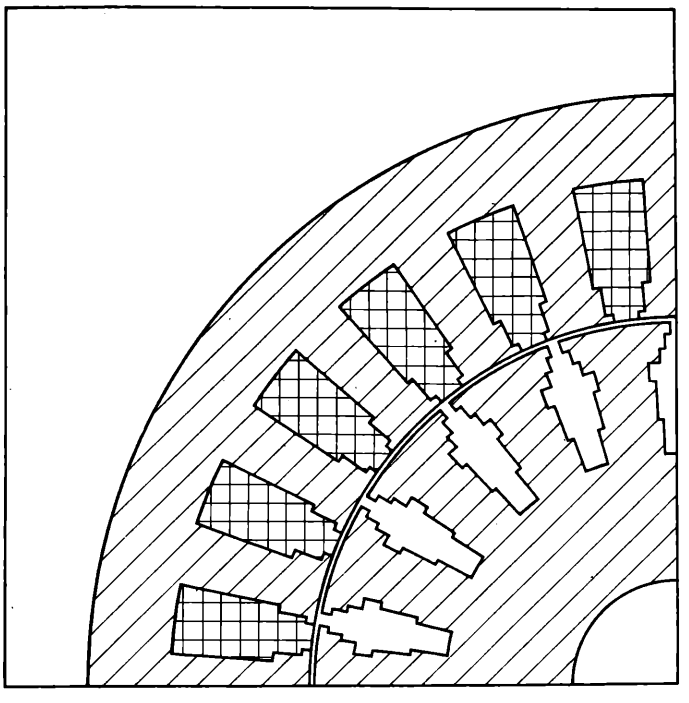
1.5. Programmkomponente GRAFIK

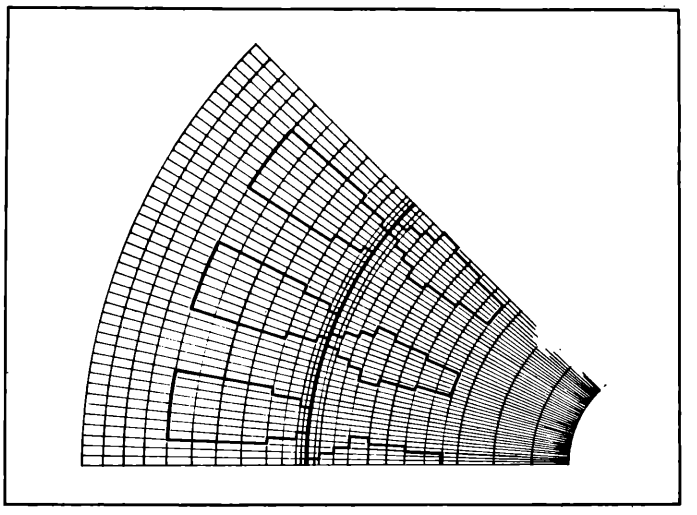
Zur Erhöhung der Aussagekraft numerischer Magnetfeldberechnungen ist es zweckmäßig, die Ergebnisse grafisch darzustellen. Die Komponente GRAFIK realisiert folgende Funktionen:

— Darstellung der Geometrie
— Darstellung des Diskretisierungsgitters
— Kennzeichnung verschiedener Materialien durch Schraffur

— Darstellung des Feldbildes mit zwei Schrittweiten
— Darstellung der Induktionskurven.

Die grafische Darstellung der Feldbilder ermöglicht es, visuell die Auslastung des Magnetkreises zu beurteilen.
Zur Realisierung der gewünschten grafischen Darstellung wurde auf das Grafiksoftwarepaket PLOTS des VEB Robotron Dresden zurückgegriffen, und es ist ein Zeichentisch DIGIGRAF 1612 erforderlich. Das Programm GRAFIK hat eine Partitionsgröße von 250 kByte und benötigt eine Rechenzeit von 5 bis 10 min.





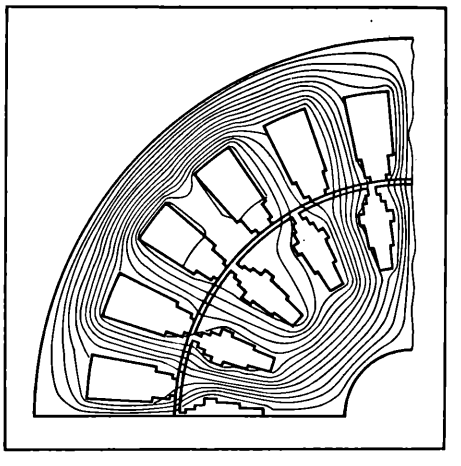
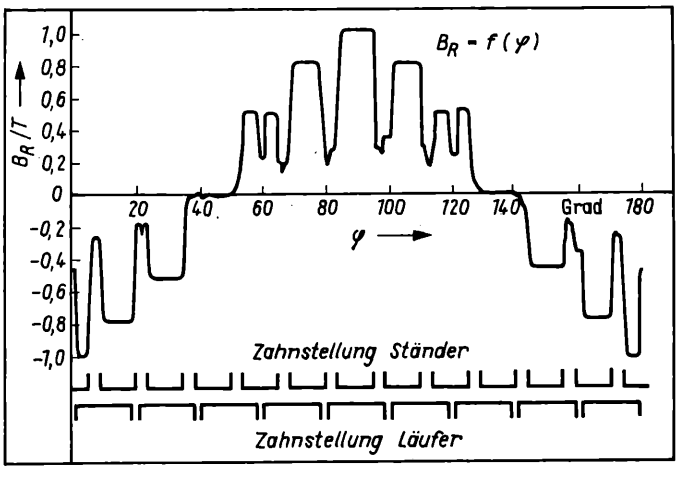


Bild 3
Asynchronmaschine
a) (links)
Diskretisierter Querschnitt einer Asynchronmaschine KMR 45 K 4
Maßstab 2.50:1
b) (oben)
Ausschnitt aus dem Diskretisierungsgitter der Asynchronmaschine
c) (rechts)
Magnetfeld der Asynchronmaschine
d) (unten)
Radialkomponente der Luftspaltinduktion der Asynchronmaschine bei Leerlauf

2. Berechnetes Beispiel

Zum Abschluß soll die Leistungsfähigkeit der gesamten Software anhand einer Asynchronmaschine bei Leerlauf beschrieben werden. Der diskretisierte Querschnitt dieser Maschine ist im Bild 3a) dargestellt. Für die Berechnung der kompletten Maschine wurde diese Geometrie mit einem Diskretisierungsnetz in Polarkoordinaten von 12000 Punkten überzogen. Ein Ausschnitt des Netzes zeigt Bild 3b). Zur Beurteilung der Auslastung des Magnetkreises ist das im Bild 3c) enthaltene Feldbild ermittelt worden. Weiterhin ist im Bild 3d) die zur Drehmomentenbestimmung notwendige Luftspaltinduktion (Radialkomponente) über zwei Polteilungen abgebildet. Die vier Bilder wurden mit der Komponente GRAFIK erstellt.



3. Zusammenfassung

Es wird ein Überblick über das an der Sektion Automatisierungstechnik der TU Karl-Marx-Stadt entwickelte Programmpaket FELD 88 gegeben. Damit kann die numerische Berechnung zweidimensionaler stationärer Magnetfelder bei Berücksichtigung nichtlinearer Materialeigenschaften auf der Basis eines Finiten Differenzenverfahrens realisiert werden. Man erhält die für den Entwurf elektromagnetischer Energiewandler notwendigen integralen Größen, wie Induktionsverteilungen, Feldbilder, Wicklungsinduktivitäten, Kräfte und Drehmomente.

Durch Einsatz eines effektiven Iterationsverfahrens konnte eine Rechenzeitreduzierung um 80% sowie eine Erhöhung der Gitterpunktanzahl von 3000 auf 12000 erreicht werden.

Die Erhöhung der Gitterpunktanzahl ermöglicht komplizierte Magnetkreiskonfigurationen zu erfassen; eine geringe Rechenzeit ist eine Voraussetzung für die Eingliederung des Programmpaketes FELD 88 als CAD-Element in den rechnergestützten Entwurf elektrischer Antriebe.

Literatur

[1] *Budig, P.-K.; Pohl, A.; Wagner, M.; Müller, D.-S.:* Numerische Berechnung magnetischer Felder als Grundlage für die Dimensionierung elektrischer Maschinen. Wiss. Z. der TH Karl-Marx-Stadt 28 (1986) 3
[2] *Pohl, A.:* Programmpaket FELD zur numerischen Berechnung stationärer Magnetfelder. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 7, S. 255–258
[3] *Pohl, A.; Müller, D.; Fischer, B.:* Numerische Parameterbestimmung elektromagnetischer Energiewandler. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 8, S. 297–300, 302

EA 6090

Das Hochspannungs-Übertragungssystem Syriens unter dem Einfluß der Luftverschmutzung

M. N. Rayes, Damaskus; H. Böhme, KDT, Dresden

Mitteilung aus der Fakultät für Elektrotechnik und Maschinenbau (FMEE) der Universität Damaskus und der
Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden

Mit der Inbetriebnahme der ersten zwei 230-kV-Freileitungen Damaskus — Homs — Aleppo traten Überschläge sowohl an den Freileitungsisolatoren als auch besonders im Umspannwerk Kattineh auf. Das führte zu Unterbrechungen der Energieversorgung. Bereits damals wurde ein Zusammenhang zwischen den Überschlägen und der Luftverschmutzung in diesem Gebiet vermutet. In den letzten Jahren wurde das Problem immer umfassender, und das überschlaggefährdete Gebiet vergrößerte sich von einem Bereich mit wenigen km Durchmesser auf einen mit etwa 100 km Durchmesser, 20 Freileitungen mit 66 kV und 230 kV umfassend.
Etwa 1983 begannen intensive theoretische und praktische Untersuchungen, um die genaueren Ursachen zu ergründen, den Zusammenhang mit der Luftverschmutzung zu quantifizieren und Lösungen zu finden [1] [2] [3].
Ausgang und Grundlage dafür waren das von der DDR an der Universität Damaskus errichtete Hochspannungslabor, die langjährige vertraglich gebundene Zusammenarbeit in Lehre und Forschung auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik zwischen der Universität Damaskus und der Technischen Universität Dresden sowie die freundliche Unterstützung durch das Ministerium für Elektroenergie Syriens[1]).
Nachfolgend werden die beobachteten Überschläge innerhalb einer mehrjährigen Zeitspanne analysiert und deren Zusammenhang sowohl mit den Verschmutzungsquellen als auch mit den klimatischen Faktoren betrachtet. Aus Laborversuchen war der Zusammenhang zwischen Überschlagspannung und Verschmutzungsgrad bekannt (Bild 1).

1. Untersuchtes Gebiet

Das untersuchte Gebiet hat einen Durchmesser von etwa 100 km, liegt in der Mitte von Syrien zwischen 34°20′ und 35°05′ nördlicher Breite und 36°10′ und 37°15′ östlicher Länge in etwa 500 m Höhe. Im Mittelpunkt liegt der Kattineh-See. Es umfaßt wüstenähnliche Landschaft im Osten und Bereiche mit geringer Vegetation am Fuß des Libanon-Gebirges im Süden; nach Westen ist die Gebirgskette unterbrochen und öffnet eine „Gasse" zum Mittelmeer; im Norden wird es von landwirtschaftlich genutzten Flächen im Tal des Oronte-Flusses begrenzt (Bild 2).

2. Überschläge

Innerhalb von 5 Jahren wurden 1767(!) Überschläge registriert. Interessant ist die Zuordnung der Fehler zur Tageszeit (Bild 3) und zum Monat (Bild 4):

a) Die Anzahl der Fehler ist nachts viel größer als am Tage. Sie ist am höchsten kurz vor Sonnenaufgang (Bild 3).
b) Die Anzahl der Fehler steigt innerhalb der Trockenperiode von Mai bis September an und ist nach Beginn der Regenperiode (September/Oktober) viel niedriger (Bild 4).

3. Schmutz-Quellen

Alle Luftverschmutzungen (durch Meeressalz, Gase, Dämpfe, Staub) sind aus elektrischer Sicht problematisch. Nachfolgend wird unterschieden zwischen Industrie- und natürlicher Verschmutzung.

3.1. Industrieverschmutzung

Die Zentren der Industrieverschmutzung — zugleich Zentren der Fehlerhäufigkeit — liegen in der Umgebung des Kattineh-Sees sowie des Kattineh-Umspannwerkes, und zwar im Bereich von Düngemittelfabriken, Öl-Raffinerien und Kraftwerken. In keinem anderen Gebiet des Übertragungssystems gibt es eine gleichartige Häufung von Schmutz-Quellen in Nähe von Freileitungen bzw. Umspannwerken.
Die chemischen Fabriken emittieren Gase und Staub, die sowohl die Umwelt als auch die elektrische Isolierung belasten.

• *Gas-Verschmutzung*
Die Schornsteine der Industriebetriebe emittieren große Mengen von Gasen, gefährlich für Umwelt und Isolierung. Folgende Gase wurden festgestellt: SO_2, H_2S, NO_2, NO_x, NH_3, SiF_4. Die Mehrzahl dieser Gase bildet bei hoher Luftfeuchtigkeit hoch leitfähige Säuren. Sie sind eine große Gefahr für die Isolation. Beispielsweise hat eine Mischung von 10 g 65-%iger Salpetersäure mit 100 g destilliertem Wasser eine Leitfähigkeit von 236 mS/cm (zum Vergleich: normales Leitungswasser hat eine Leitfähigkeit von 0,4 mS/cm).
Als kondensierte Dämpfe wurden beobachtet: P_2O_5, H_2SO_4 und H_2SiF_6. Sie sind hoch leitfähig und deshalb für die Isolation gefährlich. Der Stoff H_2SiF_6 greift sogar die Oberfläche von Glasisolatoren an.

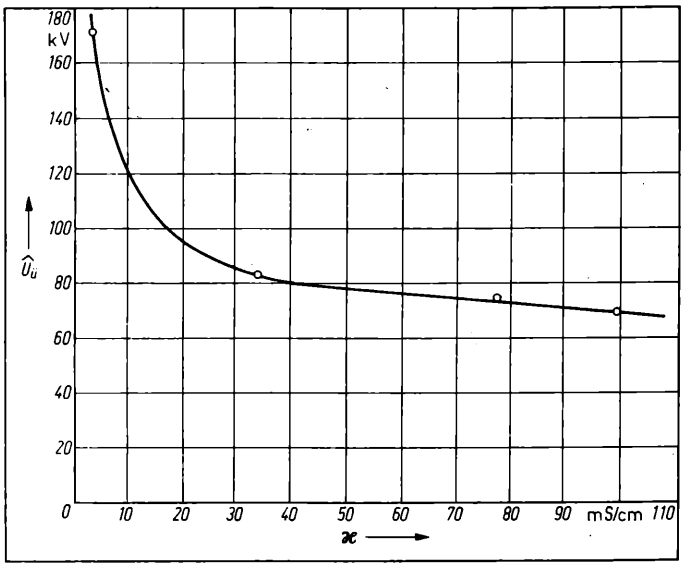
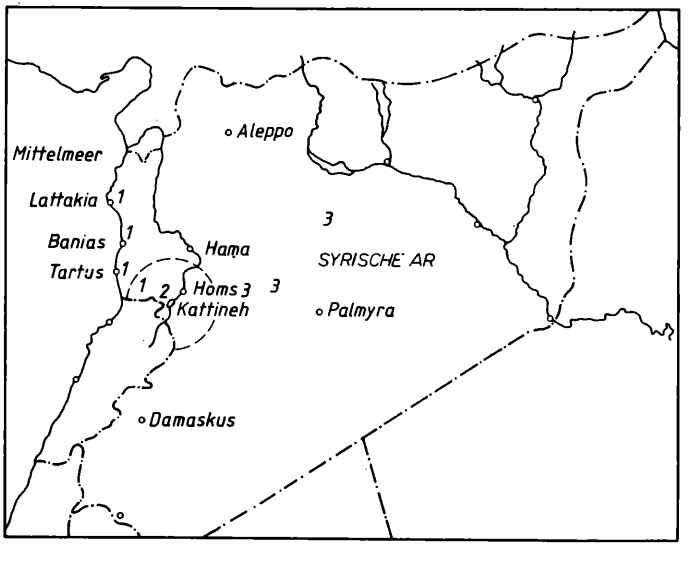


Bild 1. Kriechüberschlagkennlinie
$\hat{U}_ü$ Überschlagspannung; $\varkappa$ Leitfähigkeit der vernebelten Salzlösung

Bild 2. Gebiet häufiger Kriechüberschläge rings um Kattineh
1 Meersalz-Verschmutzung; 2 Industrieverschmutzung; 3 Verschmutzung durch Wüstenstaub



Prof. Dr.-Ing. *Mohammed Nidal Rayes* ist Leiter des Hochspannungslabors der Universität Damaskus; Prof. Dr. sc. techn. *Helmut Böhme* ist Inhaber des Lehrstuhls Hochspannungsgeräte an der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden.

[1]) Dem Minister für Elektroenergie der Syrischen Arabischen Republik, Dr.-Ing. E. h. *Kamel Baba* wurde im Oktober 1988 die Würde eines „Dr.-Ing. E. h." von der Technischen Universität Dresden verliehen.

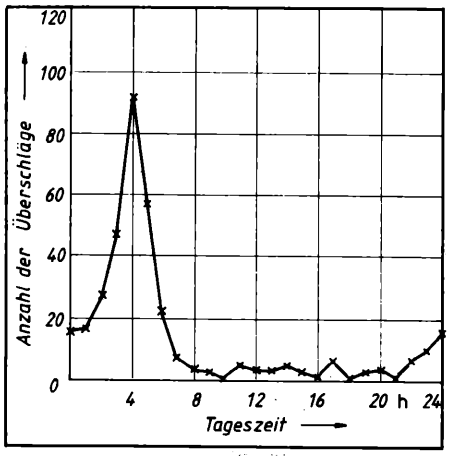


Bild 3. Verteilung der Überschläge über die Tageszeit (Beobachtungszeit: 6 Jahre)

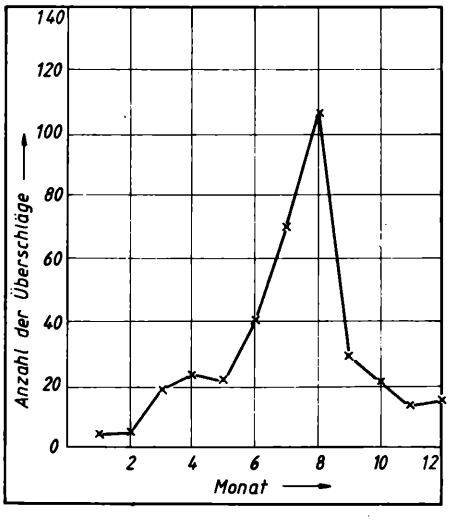


Bild 4. Verteilung der Überschläge über das Jahr (Beobachtungszeit: 6 Jahre)

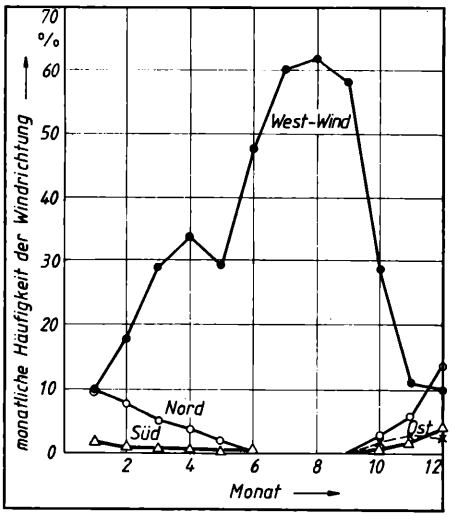


Bild 5. Häufigkeit der Windrichtung in Kattineh während eines Jahres

• *Staub-Verschmutzung*

Insbesondere die Düngemittelfabriken emittieren größere Mengen von Düngemittelstaub aus ihren Schornsteinen. Er ist sehr gefährlich für die Isolation. Etwa 10 g dieses Staubes, gelöst in 100 g destilliertem Wasser, ergeben eine Leitfähigkeit von 62 mS/cm. Da sich Staub auf den Isolatoroberflächen ansammeln kann, sind Überschläge auch bei niedrigen Spannungen (Betriebsspannungen) möglich.

Besonders unangenehm sind Abfallprodukte der P_2O_5-Produktion, die in die Atmosphäre gelangen. Entsprechend der Lage dieser Fabriken wird diese Verschmutzung vor allem bei westlichen Winden zum Umspannwerk bzw. zu den Freileitungen geblasen.

Die Abfallprodukte bestehen aus Kalziumsulfat $CaSO_4 + 2\,H_2O$ (95,8 %), Kalziumfluorid CaF_2 (2,1 %) sowie H_2SiF_6, P_2O_5, H_2SO_4 (2,1 %).

3.2. Natürliche Verschmutzung

Die natürliche Verschmutzung der Isolatoren entsteht durch Wüstenstaub, den örtliche Winde aus der Wüste herantragen und durch Meeressalz, das mit westlichen Winden vom Mittelmeer durch die „Gasse" (unterbrochene Gebirgskette) heranweht. Es gilt als sicher, daß Wind mit einer Geschwindigkeit von etwa 15 m/s Meeressalz 100 km weit trägt.

4. Klimatische Faktoren [5]

Die klimatischen Faktoren sind wichtig für den Transport der Verschmutzung, deren Ablagerung auf der Isolatoroberfläche, die Veränderung der Leitfähigkeit und Konzentration auf der Oberfläche.

4.1. Wind [4]

Wind spielt meist eine negative Rolle hinsichtlich der Schmutzablagerung auf Isolatoren. Er trägt die Verschmutzung aus großen Entfernungen heran (Meeressalz). Die Verschmutzungsprodukte lagern sich vorwiegend an Teilen der Isolatoroberfläche mit turbulenter Strömung an. Die Schmutzablagerung durch Wind innerhalb der Trockenperiode (s. Abschn. 4.3.) ist besonders gefährlich.

Untersuchungen zu Windrichtung (Bild 5) und Windstärke haben gezeigt, daß besonders in den trockenen Sommermonaten westliche Winde wehen, die Meeressalz und Abprodukte der P_2O_5-Produktion an die Isolieroberfläche tragen. Die Windgeschwindigkeit liegt im Mittel zwischen 6 und 13 m/s, erhöht sich aber in Sommermitte auf 14 bis 23 m/s und flaut im September/Oktober auf 1 bis 5 m/s ab (zum Vergleich: die mittlere Windgeschwindigkeit in Dresden beträgt $\approx$ 3 m/s). Die Windstärke reicht also aus, Meeressalz vom Mittelmeer heranzutragen.

4.2. Luftfeuchte

Die Luftfeuchte spielt für den Überschlag verschmutzter Isolatoren eine wichtige aber negative Rolle, weil bei hoher Luftfeuchte und tageszeitlichen Temperaturschwankungen insbesondere vor Sonnenaufgang Tauniederschlag möglich ist. Durch diesen Taubelag wird die Schichtleitfähigkeit der Schmutzschicht infolge Dissoziation erhöht und Überschläge werden wahrscheinlich.

Tatsächlich ist in dem untersuchten Gebiet rings um Kattineh innerhalb der sommerlichen Trockenperiode die Luftfeuchte hoch, erkennbar an der hohen Anzahl der Tage mit Luftfeuchten $> 80\,\%$ je Monat von Juni bis August (Bild 6).

4.3. Niederschläge

Regen ist meist günstig für verschmutzte Isolatoren, weil durch ihn die Isolatoroberfläche gereinigt wird. Ebenso reinigt Regen die Atmosphäre von Schadgasen und Staub am Entstehungsort und verhindert damit, daß diese Schadstoffe vom Wind zur Isolierung getragen werden. Allerdings regnet es im untersuchten Gebiet (im Gegensatz zu Mitteleuropa) zwischen Mai und Oktober praktisch nicht (Bild 7). Zu dieser Zeit ist also mit einem Anwachsen der Fremdschicht auf der Isolatoroberfläche zu rechnen.

4.4. Inversion

Inversionswetterlagen (Lufttemperatur nimmt mit der Höhe über den Erdboden zu) verhindern eine Ausbreitung von bodennahen Luftverschmutzungen in höheren Atmosphärenschichten und vergrößern damit die Konzentration der Luftverschmutzung in Isolatornähe.

Im untersuchten Gebiet rund um Kattineh tritt diese Situation mehrmals jährlich auf.

5. Ergebnisse

Die Luftverschmutzung in Verbindung mit den klimatischen Faktoren ist die Hauptursache für die beobachteten Fehler hinsichtlich Anzahl sowie jährlicher und tageszeitlicher Verteilung.

a) Ein Vergleich der Angaben zur Verteilung der Fehler (Bilder 3 und 4) mit den Angaben zur Windrichtung (Bild 5); Westwind trägt den meisten und gefährlichsten Schmutz an die Isolatoren), Luftfeuchte (Bild 6) und Niederschlagsmenge (Bild 7; keine Niederschläge von Mai bis Oktober) offenbart die komplette Übereinstimmung zwischen Fehlerhäufigkeit und den klimatischen Faktoren, die einen Kriechüberschlag begünstigen. Logischerweise ist festzustellen, daß die meisten Überschläge während der Trockenperiode (Bild 4) und während der Tageszeit mit höchster Luftfeuchte und Taubildung vor Sonnenaufgang (Bild ?) auftreten.

b) Eine Korrelationsanalyse zwischen der Überschlaghäufigkeit von Leitungen, die in der Hauptwindrichtung der Abprodukte von zwei Chemiebetrieben (Kattineh T.S.P. und Feizura T.S.P.) liegen, und der Menge der produzierten Düngemittel innerhalb der Trockenperiode (Bild 8) zeigt zwei interessante Ergebnisse:

1. Die Produktionsmenge von einigen 10^3 t Stickstoffdüngemittel führt zu keiner erhöhten Überschlaghäufigkeit.

2. Produktionsmengen von mehr als 10^4 t Stickstoffdüngemittel erhöhen die Fehlerhäufigkeit signifikant.

c) Glasisolatoren in Höhe der chemischen Fabriken sind mit einer harten Fremdschicht bedeckt, verursacht von SiF_4. Dieser Stoff greift die Glasoberfläche an.

d) An einem Tag mit Inversionswetterlage (20. Januar 1984) und 100 % Feuchte war die Fremdschichtkonzentration so hoch, daß praktisch jedes Feld im Umspannwerk durch Überschlag ausfiel.

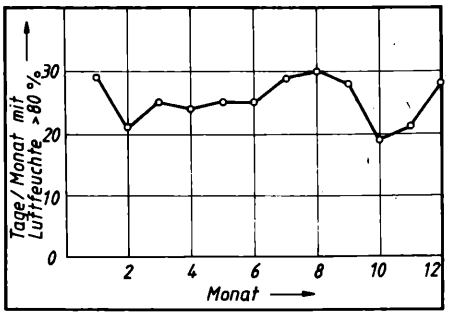


Bild 6
Anzahl der Tage je Monat mit einer Luftfeuchte höher als 80 %

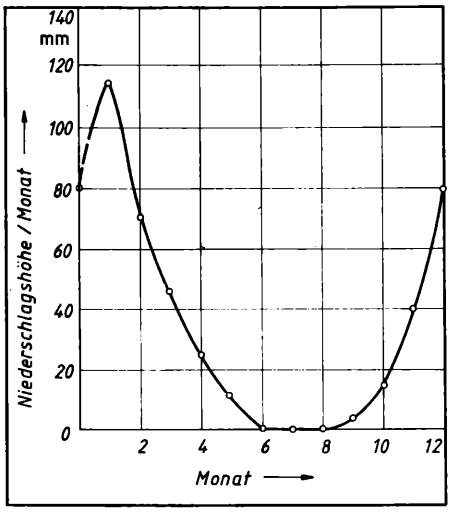


Bild 7
Verteilung der monatlichen Niederschlagsmenge über das Jahr

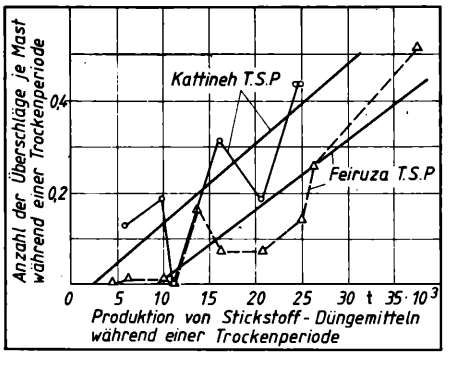


Bild 8
Korrelation zwischen Fehlerhäufigkeit und Produktionsmenge der Chemiebetriebe während der Trockenperiode
T. S. P. Tri-Super-Phosphat Fabrik

e) Abprodukte der chemischen Fabriken wurden in der Hauptwindrichtung bis zu einer Entfernung von 20 km in den Isolatorfremdschichten nachgewiesen.

6. Schlußfolgerung

Aus vorstehenden Ergebnissen zum Zusammenhang zwischen Verschmutzung und Überschlaghäufigkeit (d.h. Störung der Elektroenergieversorgung) wurden und werden Maßnahmen zur besseren Isolation von Freileitungen und Umspannwerken, zur Verminderung der Schmutzemission sowie zur Nutzung des in die Umwelt abgeblasenen Stoffs als Rohstoff für andere Industriezweige abgeleitet [6].

Literatur

[1] *Rayes, M. N.:* Fremdschichtprobleme im Elektroenergieübertragungsnetz der Syrischen Arabischen Republik. 10. Wiss. Konferenz der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden, 1984, Reihe H, S. 25–28

[2] *Jacobsen, J. K.; Pedersen, J. K.:* Field and Laboratory Tests for the Proper Dimensioning of Insulators Exposed to Salt Pollution (Netz- und Laborversuche zur Dimensionierung von Isolatoren, die Salzverschmutzung ausgesetzt sind). CIGRE-Bericht 33–11, 1978

[3] *Krsztaluk, R.; Czaplak, W.; Kucharski, K.:* Pollution Measuring, Contaminated Insulator Testing and Choice of Insulators (Verschmutzungsmessung, Prüfen verschmutzter Isolatoren und Auswahl der Isolatoren). CIGRE-Bericht 33–07, 1978

[4] *Böhme, H.; Zeh, H.:* Schmutzablagerung durch Wind an Isolatoren. ELEKTRIE, Berlin (1967) 7, S. 239 u. 240

[5] Climatic Atlas of Syria (Klima-Atlas von Syrien). Meteorological Department Damascus 1977

[6] *Bartholome, E.:* Umweltfreundliche Technologien. Karlsruhe: Verlag C. F. Müller 1973

EA 6006

Realisierung von Diagnosemethoden mit Hilfe der Schaltanlagenleittechnik auf Mikrorechnerbasis

H. Bauer, KDT; K. Gnüchtel, KDT; O. Leucke, KDT; J. Schindler, KDT; Dresden

Die Diagnostik ist ein wirksames Hilfsmittel, um im Sinne einer Redundanz parallel zur Beherrschung von Werkstoff und Konstruktion zu einer Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit beizutragen. Integriert in eine zuverlässige Leittechnik zielen die Diagnosemittel auf eine Reduzierung der Häufigkeit für unerwartete Ausfälle von Komponenten der Energiehauptausrüstungen oder auf eine Verringerung der Ausfalldauer, wie beispielsweise bei der Bestimmung der Fehlerortentfernung.
In Abhängigkeit von den erforderlichen Eingangsgrößen des Algorithmus für jedes Diagnosemittel werden außer Zuverlässigkeitsanforderungen auch Anforderungen bezüglich Genauigkeit, Taktsynchronität der Meßwertabtastung, Reaktionszeit und Speichertiefe an die Komponenten der Leittechnik gestellt. Hierfür ist die Eigendiagnose der Leittechnik eine wichtige Voraussetzung.
Vor einem Netzeinsatz wird für die ausgewählten Diagnosefunktionen eine Prüfung von Algorithmen und Baugruppen mit Hilfe von Mikrorechner-Arbeitsplätzen und Netzmodellen erforderlich.

1. Zielstellung

Die in die mikrorechnergestützte Leittechnik zu integrierenden Diagnoseverfahren haben das Ziel, die Ausfallhäufigkeit und die Ausfalldauer der Energiehauptausrüstungen zu verringern und dadurch zu einer Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit beizutragen. Die Zuverlässigkeit der Leittechnik ist hierzu eine wichtige Voraussetzung, demzufolge Diagnosemittel für deren Komponenten mit einzubeziehen sind (Tafel 1).
Es ist vom Grundsatz auszugehen, daß Unzuverlässigkeiten in erster Linie unmittelbar durch Beseitigung der Ursachen reduziert werden, beispielsweise durch Verbesserung und Beherrschung von Werkstoff und Konstruktion. In zweiter Linie sollte die Diagnostik im Sinne der Redundanz oder zur Herunterpegelung wirtschaftlich nicht vermeidbarer Unzuverlässigkeiten ergänzend eingesetzt werden. Hierbei ist stets zu beachten, daß alle Maßnahmen, die nicht die Ursachen der Unzuverlässigkeit beseitigen, sondern durch Einwirkung auf das Umfeld negative Auswirkungen auf Funktionen des Systems vermeiden wollen, neben Unterfunktionen auch Überfunktion des Diagnosemittels ermöglichen. Jede Überfunktion kann aber auch eine Verringerung der Zuverlässigkeit bewirken.
Bei der Koordination zwischen Sicherheit und Zuverlässigkeit wird die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit für gefährdende Zustände, eventuell auch zu Lasten einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit für hemmende Zustände, beabsichtigt.
Die Häufigkeit für unerwartete Ausfälle kann reduziert werden, indem bei bekanntem Schädigungsprozeß durch Einflußnahme auf den Prozeß der Fehler vermieden oder der Zeitpunkt für den Fehlereintritt vorausberechnet wird sowie bei unbekanntem Schädigungsprozeß Erfahrungswerte für Beanspruchung oder Stehvermögen kontrolliert werden (Tafel 1).
Ist der Fehler bereits eingetreten, liefert die Diagnose durch die Bestimmung von Fehlerart und Fehlerort sowie durch Bewertung alternativer Schaltzustände einen Beitrag zur Verkürzung der Ausfalldauer.

2. Diagnosemittel für die Leittechnik

2.1. Vorausberechnung des Fehlereintritts

Die Diagnosefunktionen sind auf einzelne Schaltkreise, auf Baugruppen oder auf das Gesamtsystem orientiert.

Doz. Dr.-Ing. *Hartmut Bauer* ist Hochschuldozent; Dipl.-Ing. *Olaf Leucke* ist Forschungsstudent an der TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, Wissenschaftsbereich Elektroenergietechnik, Dipl.-Ing. *Konrad Gnüchtel* ist Hauptabteilungsleiter; Dipl.-Ing. *Jörg Schindler* ist Gruppenleiter im VEB „Otto Buchwitz" Starkstrom-Anlagenbau Dresden.

Tafel 1. Beispiele für in die Leittechnik integrierte Diagnosemittel
(ADU Analog-Digital-Umsetzer; BER Bitfehlerrate; EMV Elektromagnetische Verträglichkeit; LWL Lichtwellenleiter; RESPE Resonanz-Sternpunkterdung; SYF Synchron-Fehler bei der Taktübertragung)

Ziele und Bedingungen		Diagnosemittel						
		für Energiehauptausrüstungen				für Leittechnik		
		Werkstoff[1])	Betriebsmittel	Anlage	System	Schaltkreis	Baugruppe	System
Vor Fehlereintritt	Schädigungsprozeß bekannt		Lebensdauerfahrweise Transformator	Überlastung Freileitung	Stabilitätsbewertung	ADU-Drift und Offset	Zählung BER für LWL	Taktüberwachung SYF
	Schädigungsprozeß unbekannt		Ausschaltstromsumme Leistungsschalter	Überlastung Stromleitanordnung	Ausfallsimulation	Überwachung Meldungen	Überwachung Steuerung	Überwachung EMV-Barrieren
Nach Fehlereintritt	Redundanznutzung		Umschaltung bei Nutzung von Ratgebersystemen mit Datenbasis und Wissensbasis (Last- und Kurzschlußstromberechnung)			Vergleich und Plausibilitätstests neben Ersatzdatenbeschaffung		Watch dog für Softwarefehler
	Reduzierung Fehlererkennungsdauer			Fehlerart- und -ortbestimmung	Erdschlußortung im Netz bei RESPE	Baugruppengenaue Fehlerortung		

[1]) Einbeziehung in die Leittechnik erfordert Entwicklung spezieller Sensorik

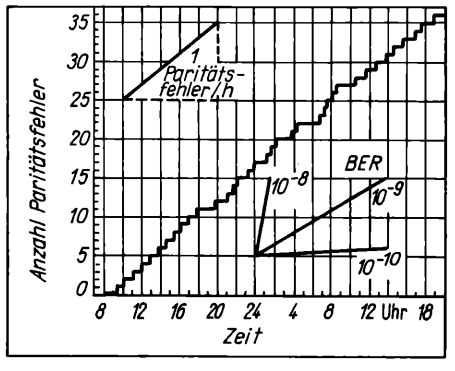


Bild 1
Auswertung der Bitfehlerrate BER einer Lichtwellenleiter-Datenübertragung während des Dauerbetriebes (Übertragungsrate 204,8 kbit/s)

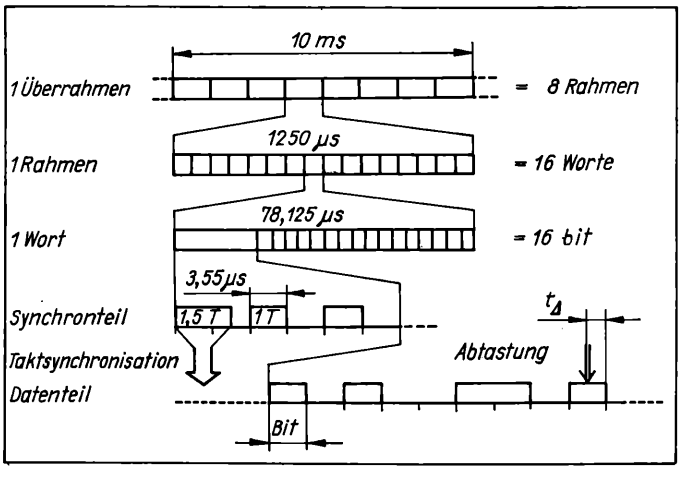


Bild 2
Lichtwellenleiter-Datenübertragungsstruktur und Bitabtastung
T Taktbreite; t_Δ Taktabweichung infolge fehlender Taktsynchronisierung

Viele Funktionen der Leittechnik, z. B. die Überprüfung der Einschaltbedingungen (Synchrocheck), stellen bestimmte Anforderungen an die Genauigkeit der Messung. Aus diesen Anforderungen läßt sich ableiten, bis zu welchen Abweichungen des Analog-Digital-Umsetzers (Drift oder Offset) die fehlerfreie Funktion zu erwarten ist. Durch diagnosefähige ADU-Baugruppen kann die Drift auch im Langzeitbereich bestimmt und dadurch der Zeitpunkt für den Fehlereintritt näherungsweise vorausberechnet werden. Durch den vom Rechner empfohlenen Austausch der betreffenden Baugruppe bis zu diesem Zeitpunkt oder aber durch die Meßwertverarbeitung mit automatisch korrigierten Werten wird der Fehlereintritt vermieden.

Bei Lichtwellenleiterübertragungen kann die Entwurfszuverlässigkeit (z. B. Bitfehlerrate 10^{-9}) auch während des Dauerbetriebes überprüft werden (Bild 1). Maßnahmen zur Fehlertoleranz ermöglichen mit hoher Wahrscheinlichkeit die fehlerfreie Funktion der Leittechnik, wenn die Bitfehlerrate (BER) bestimmte Maximalwerte nicht überschreitet. Die ständige Überwachung dieses Kennwertes kann Hinweise auf eine beschleunigte Alterung des Lichtwellenleiters oder der Senderdiode liefern. Durch Empfehlungen zur Auswechslung bis zu einem extrapolierten Termin werden kritische Mehrfachfehler mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden.

Der Ausfall von Synchronisiertakten kann infolge der Quarzfrequenzabweichungen zum Asynchronismus zwischen Sender und Empfänger einer Lichtwellenleiter-Übertragung und auf diesem Wege zu vielfachen Bitfehlern führen. Die Auswertung des Beginns eines Asynchronlaufs ermöglicht die näherungsweise Berechnung des Zeitpunktes für den Beginn der fehlerhaften Abtastung des Dateninhaltes auf der Empfangsseite (Bild 2).

Wird vorausgesetzt, daß bei Taktdifferenzen größer t_Δ zwischen Sendertakt (korrigiert um die Laufzeit im LWL) und Empfängertakt der Dateninhalt falsch wird, so ist bei relativen Quarzfrequenzabweichungen ε zwischen Sender f_S und Empfänger f_E

$$\varepsilon = \frac{f_S - f_E}{f_E} \tag{1}$$

diese Taktdifferenz nach Ablauf der fehlerfreien Zeit

$$t_f = \frac{t_\Delta}{\varepsilon} \tag{2}$$

zu erwarten. Während dieser Zeit kann der Rechner die Blockierung gefährdender Zustände veranlassen.

Bei unbekanntem Schädigungsprozeß kann durch ein vom Rechner veranlaßtes Abschalten oder Aufschalten der Meldespannung der Logikwechsel auch für Einbit-Meldungen simuliert und ein möglicher Fehler geortet werden noch bevor eine fehlerhafte Meldung entsteht.

Zeit- oder ereignisgesteuert wird eine umfassende Diagnose für die Funktion Steuerung durchgeführt. Dabei werden während des laufenden Betriebes durch jeden Verarbeitungsrechner die in der Vor-Ort-Elektronik an der Steuerung beteiligten Baugruppen schrittweise getestet. Die Schritte sind so programmiert, daß durch Nutzung der Barrieren und Wahl der Prüf-Reihenfolge Fehlfunktionen auch bei einem fehlerhaften Bauelement vermieden werden. Die dabei verwendeten Pseudo-Schaltkommandos für Blindschalter sowie die definierten Fehler in diesen Kommandos ermöglichen eine Überprüfung der Steuerung hinsichtlich Überfunktion und Unterfunktion sowie bei Bauelementefehlern eine überwiegend baugruppengenaue Ortung des Fehlers. Durch diese kurze Fehlersuchdauer und durch die Reduzierung der Ausfalldauer auf die Zeit für den Baugruppenwechsel ist auch eine hohe Systemverfügbarkeit gegeben.

Für eine hohe Funktionszuverlässigkeit der Leittechnik ist die Beherrschung der EMV Voraussetzung. Das wird durch EMV-Barrieren an den Prozeßschnittstellen und innerhalb der elektronischen Schaltungen erreicht. Die Wirksamkeit der an den Schnittstellen realisierten Schutzbeschaltungen wird in geeigneter Weise überwacht. Diagnostizierte Abweichungen vom Normalverhalten führen zur Meldung und können für die Blockierung kritischer Funktionen genutzt werden.

2.2. Verkürzung der Fehlersuchdauer

Wie bereits bei der Diagnose für die Funktion Steuerung beschrieben, ermöglicht die baugruppengenaue Fehlerortung eine hohe Verfügbarkeit des betrachteten Systems, so daß unter Einbeziehung der Redundanz die Ausfallwahrscheinlichkeit für eine Funktion des Gesamtsystems infolge von Mehrfachfehlern sehr niedrig gehalten werden kann. Die Hauptaufgabe der Diagnose bei dieser Fehlerortung besteht darin, die folgenden Testschritte jeweils in Ab-

hängigkeit der Testergebnisse von vorangehenden Schritten durchzuführen, dabei einen Informationszuwachs zu erreichen und gefährdende Zustände, beispielsweise eine Fehlsteuerung, stets mit hoher Wahrscheinlichkeit zu vermeiden. Für eine effektive Programmierung sind Erfahrungen über die Ausfallhäufigkeit bestimmter Bauelemente zu nutzen. Die Grenzen für die On-line-Wirkung der Diagnoseergebnisse sind zu optimieren, da sonst eine hohe Empfindlichkeit bei verbleibender Unschärfe des Fehlerortes zu einer Überfunktion der Diagnose und demzufolge zur Verringerung der Funktionszuverlässigkeit führen können.
Vorteilhafter ist hierfür die Ergänzung der Eigendiagnose mit einem Ratgebersystem, so daß dem Bediener beispielsweise ein Baugruppenwechsel empfohlen wird oder aber auch bestimmte Zusatzprüfungen veranlaßt werden, für die der Diagnose bisher keine zuverlässigen Sensoren zur Verfügung stehen.
Von großer Bedeutung ist die Erkennung und Tolerierung von Programmlauffehlern infolge von Softwarefehlern. Hierfür hat sich die Watch-dog-Funktion bewährt. Eine zuverlässige Beseitigung der fehlerhaften Programmbearbeitung ist durch die hardwareseitige Watch-dog-Realisierung, verbunden mit einer Wirkung als Fehler-Reset zu erreichen.
Alle diese Diagnosemethoden sichern die hohe Zuverlässigkeit für die Funktionen der Leittechnik und sind eine notwendige Voraussetzung auch für Diagnosemittel, die auf Energiehauptausrüstungen orientiert sind.

3. Diagnosemittel für die Primärausrüstungen

3.1. Fehlervermeidung und vorbeugende Außerbetriebnahme

Ausgehend von der Erfahrung, daß auf die Transformatorinnenisolierung bei erhöhter Temperatur ein kumulativer Schädigungsprozeß wirkt, kann der Schädigungszustand näherungsweise als Lebensdauerverbrauch bewertet werden. Zur Bestimmung der Heißpunkt-Temperatur des Transformators werden Messungen angestrebt und zur Zeit mathematische Modelle mit den Eingabemeßwerten für Belastungsstrom, Umgebungs- oder Öltemperatur und für den Lüfter- oder Ölumwälzpumpeneinsatz verwendet. Auf dieser Grundlage ist es möglich, die Lebensdauerverkürzung infolge ständiger erhöhter Belastung zu berechnen. Ziel der Lebensdauerfahrweise des Transformators ist es, die Zeitdauer für erhöhte und verminderte Belastungen so zu koordinieren, daß mindestens die gleiche Lebensdauer (normative Nutzungsdauer) wie bei dauernder Belastung mit Nennleistung erreicht wird.
Ist der Schädigungsprozeß nicht exakt beschreibbar, können die gemessenen Belastungen mit empirisch ermittelten Schwellwerten verglichen werden, beispielsweise durch Vorgabe von Grenzwerten für die Kontaktbeanspruchung von Leistungsschaltern als Summation des Ausschaltstromes bei Normalbetrieb I_{ab} und bei Kurzschluß I_{ak}

$$I_{a\Sigma} = \sum_{\nu=1}^{n} f_b\,(I_{ab\nu}) + \sum_{\nu=1}^{m} f_k\,(I_{ak\nu});\quad f_\mu\,(I_{a\mu\nu}) = \in \begin{cases} I_{a\mu\nu} \\ I_{a\mu\nu}{}^2 \\ c_\mu\, I_{a\mu\nu}{}^2. \end{cases} \tag{3}$$

Durch die Wartung des Leistungsschalters bei Erreichen dieses Wertes kann ein Leistungsschaltversagen infolge Kontaktschädigung mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden werden. Der Zeitpunkt ist bei Erfassung der Ausschaltströme mit Hilfe der am Leistungsschaltereinsatzort zu erwartenden Schalthäufigkeiten abschätzbar.
Bei Freileitungen ist der Durchhang von der Leitertemperatur abhängig. Ausgehend vom Belastungsstrom, der Umgebungstemperatur, der Sonneneinstrahlung und von der Windgeschwindigkeit können unter Beachtung der für den Netzschaltzustand zu erwartenden Kurzschlußströme und deren Dauer die Seildurchhänge für den Fehlerfall berechnet werden. Unter der Voraussetzung, daß auch bei eventuellem Fehler der Durchhang für die Freileitungen einen Maximalwert nicht überschreitet, sind Maximalwerte für die Vorbelastung bestimmbar und als Vergleichswerte für die Belastungsüberwachung zu verwenden. Dadurch werden auch bei Nutzung eines maximalen Belastungsspielraumes Mindesthöhen der Leiterseile über dem Erdboden nicht unterschritten und somit Gefährdungen vermieden. Bei Nutzung von stochastischen Modellen sind auch Gefährdungswahrscheinlichkeiten für die Entscheidungsempfehlungen verwendbar.
Ist für Stromleitanordnungen der Schädigungsprozeß nicht vollständig zu beschreiben, können für die maximalen Beanspruchungen Grenztemperaturen vorgegeben werden. In Abhängigkeit von der Vorbelastung während der von den Zeitkonstanten abhängigen Gedächtniszeit müssen die zulässige Belastung für eine vorgegebene Zeitdauer bzw. die zulässige Dauer für einen gemessenen Belastungsstrom berechnet werden. Unter Voraussetzung der Zeitinvarianz ist die Beanspruchung x_a über die diskontinuierliche (Zeitintervall Δt) Faltung mit Hilfe der experimentell ermittelten Gewichtsfunktion $g\,(t)$ aus der Belastung x_e bestimmbar [1]:

$$x_a\,(\nu\,\Delta t) = \Delta t \sum_{\mu=0}^{n} g\,(\mu\,\Delta t)\;\; x_e\,[(\nu - \mu)\,\Delta t] + x_{a0}. \tag{4}$$

Die Versorgungszuverlässigkeit in einem Elektroenergiesystem ist auch von der Stabilität des Netzes abhängig. Unter Nutzung mathematisch-physikalischer Modelle können die elektromagneto-mechanischen Ausgleichsvorgänge für ausgewählte Ereignisse, beispielsweise Kurzschlüsse, vorausberechnet und Schlußfolgerungen für den Betrieb des Netzes abgeleitet werden. Grundlage für diese Berechnungen ist die Zustandsgleichung für das Elektroenergiesystem

$$F\,\dot{z} + G\,z = x. \tag{5}$$

Durch Ausfallsimulation von Übertragungselementen, z.B. Leitungen, wird die Veränderung des Lastflusses im Netz berechnet. Die Möglichkeiten von Überlastungen anderer Leitungen sind zu bewerten, ob sie kurzzeitig zu Folgeausfällen führen werden. In diesen Fällen wird eine Korrektur des Ausgangsschaltzustandes empfohlen.
Darüber hinaus wurden für die Diagnose Verfahren wie TE-Meßtechnik, Rauschanalyse, Infrarot-Meßtechnik und Widerstandsmeßtechnik entwickelt, die erfolgreich zur Erkennung von Vorfehlerzuständen an Transformatoren oder Klemmverbindungen eingesetzt werden. Infolge der noch hohen Sensorkosten erfolgt gegenwärtig deren manueller ortsveränderlicher Einsatz. Eine Integration in die Leittechnik wird durch Vereinfachung der Sensoren, beginnend für die hochwertigsten Betriebsmittel, beispielsweise Transformatoren, möglich. Diese Diagnosemittel haben das Ziel, durch eine vorbeugende Außerbetriebnahme des betreffenden Betriebsmittels oder Anlagenteils unplanmäßige Ausfälle zu vermeiden.

3.2. Verkürzung der Fehlerdauer

Nach Eintreten eines zufälligen, d.h. eines nicht vorausbestimmbaren Fehlers, kann die Versorgungszuverlässigkeit durch eine Reduzierung der Fehlerdauer günstig beeinflußt werden. Ist innerhalb des Systems oder der Anlage Redundanz vorhanden, wird nach Diagnose der Fehlerart und nach Überprüfung der Be- und Überlastungsfähigkeit der redundanten Pfade durch eine automatische Umschaltung die Fehlerdauer auf die Umschaltdauer reduziert. Beispielsweise kann bei einer Transformatorbank ein havarierter Transformatorpol nach eindeutiger Fehlerlokalisierung automatisch durch die Leittechnik herausgetrennt und der Reservepol über die entsprechenden Trenner eingebunden werden, so daß diese Umschaltung in der Transformatorbank nur 1 bis 10% der gegenwärtig benötigten Zeit beansprucht.
Bei Hochspannungs-Übertragungsleitungen ist es möglich, die Fehlersuchdauer wesentlich zu verkürzen, wenn die Entfernung des Fehlerortes vom Umspannwerk berechnet und durch die Leittechnik angezeigt wird. Da die mikrorechnergestützte Schutztechnik (Distanzschutz der 3. Generation) das Schutz-Aus-Kommando an den Leistungsschalter nach Vergleich der berechneten Fehlerentfernung mit der Leitungslänge gibt, kann diese berechnete Fehlerentfernung von der Leittechnik übernommen werden. Für diese Schutztechnik sind Mikroprozessorsysteme erforderlich, die in 1 ms die etwa 50 äquivalenten Multiplikationen der Schutzalgorithmen für die drei Leiter-Erde und drei Leiter-Leiter-Schleifen lösen.
Werden durch die Rechner-Baugruppen der Leittechnik die Abtastwerte für die Ströme und Spannungen nach Fehlereintritt gespeichert, kann die Fehlerentfernung auch ohne digitale Schutztechnik mit diesen Rechnern im Rahmen einer relativ langsamen Taskbearbeitung berechnet werden. Bei dieser Diagnosefunktion sind die gleichen Algorithmen wie für den digitalen Distanzschutz notwendig, wobei sich gleichzeitig Genauigkeitsaussagen unter Netzeinsatzbedingungen ergeben, was zur Vorbereitung für den Einsatz im Schutzbaustein nutzbar ist.

4. Voraussetzungen der Leittechnik

4.1. Genauigkeit und Zuverlässigkeit [2]

Die Genauigkeitsanforderungen, die durch Diagnosefunktionen an die Leittechnik gestellt werden, sind für die meisten Funktionen mit maximal zulässigen Fehlern von 5 bis 10% relativ gering

Tafel 2. Anforderungen ausgewählter Diagnosemittel an die Leittechnik

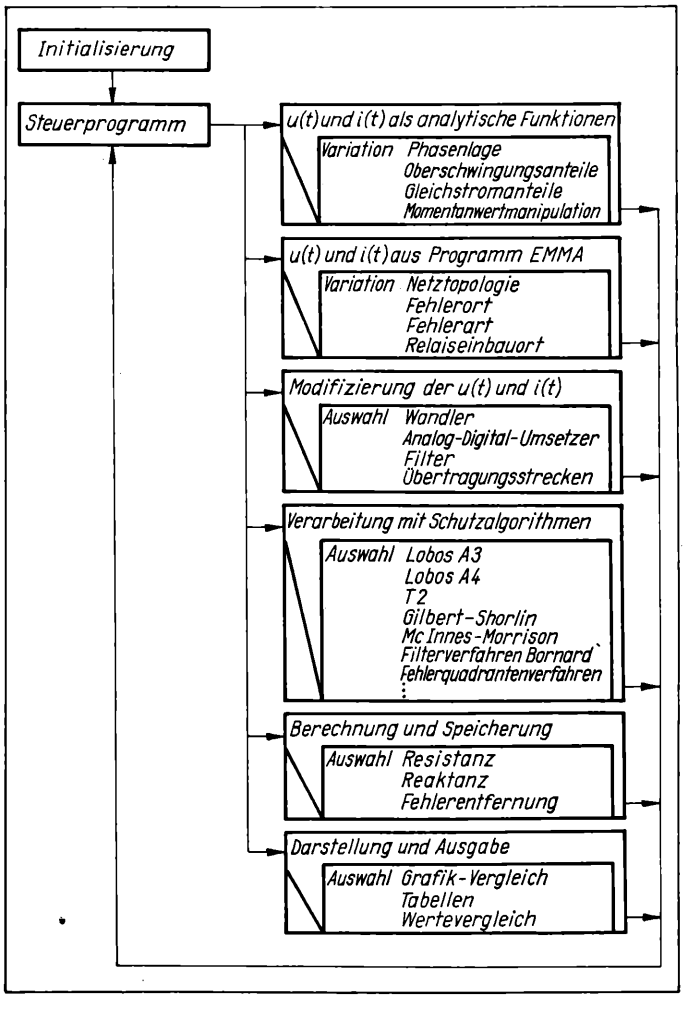
	Diagnosemittel (vgl. Tafel 1)	Anforderungen Zuverlässigkeit	Genauigkeit	Reaktionszeit	Gedächtniszeit	Datenspeicher	Wissensspeicher	Hardwarezusatz
Für Leittechnik	ADU-Drift	gering	0,1 %	1 h	1 a	1 KByte	1 KByte	ja
	BER für LWL	hoch	5 %	80 µs	1 a	1 KByte	1 KByte	ja
	Taktüberwachung	hoch	5 %	1 µs	1 s	10 Byte	1 KByte	ja
	Steuerung	sehr hoch	5 %	1 µs ··· 200 ms	10 s	100 Byte	10 KByte	ja
	EMV-Barrieren	hoch	10 %	10 ns	1 a	100 Byte	1 KByte	ja
	Watch dog	sehr hoch	–	1 ms ··· 1 s	1 s	10 Byte	100 Byte	ja
	Fehlerortung	hoch	–	1 µs ··· 1 s	100 h	1 KByte	100 KByte	ja
Für Hauptausrüstungen	Transf.-Lebensdauer	gering	2 %	100 s	1 a	1 KByte	10 KByte	nein
	LS-Ausschaltstrom	hoch	10 %	(40 ms) 1 h	10 a	100 Byte	1 KByte	nein
	Stromleitanordnung	hoch	2 %	10 s	10 h	1 KByte	10 KByte	nein
	Stabilitätsberechnung	gering	5 %	100 s	1 a	10 KByte	100 KByte	nein
	Ausfallsimulation	gering	5 %	100 s	1 a	10 KByte	100 KByte	nein
	Umschaltungen	sehr hoch	5 %	10 ms	10 ms	10 KByte	100 KByte	nein
	Fehlerentfernung	gering	1 %	(40 ms) 10 s	10 s	1 KByte	10 KByte	nein

(Tafel 2). Bei der Auswertung von Zählerständen können signifikante Unregelmäßigkeiten, z. B. ein Dämpfungsanstieg im Lichtwellenleiter oder eine wirkungslose EMV-Barriere, oft durch Änderungen um eine Größenordnung diagnostiziert werden. Mit größerer Genauigkeit sind die überhöhten Belastungen von Transformatoren und Stromleitanordnungen zu messen, da hierbei Belastungsunterschiede von 5 bis 10 %, z. B. 1,4 I_n statt 1,3 I_n, einen wesentlichen Entscheidungsspielraum eröffnen. Bei langen Übertragungsleitungen, beispielsweise bei einer 100 km langen 380-kV-Leitung oder bei Kabelleitungen, sollte die Fehlerentfernungsberechnung möglichst weniger als 1 % Fehler haben.

Wesentlich höhere Genauigkeitsanforderungen werden an diagnosefähige ADU-Baugruppen gestellt. Für die Verrechnungszählung sind 12-bit-Analog-Digital-Umsetzer erforderlich, demzufolge Abweichungen kleiner 0,1 % zu diagnostizieren sind.

Besonders hohe Zuverlässigkeitsanforderungen werden durch die Diagnosefunktionen gestellt, die auf leittechnische Funktionen mit Sicherheitsanspruch, beispielsweise die Steuerung, orientiert sind (Tafel 2). Ebenso wie diese leittechnischen Funktionen erfordern auch die betreffenden Diagnosemittel strukturelle hardwaremäßige aber auch serielle Softwareredundanz.

Bild 3. Softwarestruktur für die Simulation des Elektroenergienetzes und des Schutzes einschließlich der Wandler auf einem Personal-Computer



4.2. Zeitanforderungen [2]

Anhand der notwendigen Reaktionszeit ist darüber zu entscheiden, ob das betreffende Diagnosemittel softwaremäßig bei Verwendung bereits für leittechnische Funktionen erfaßter Meßwerte und Meldungen realisierbar ist oder ob hierfür spezielle Hardwarebaugruppen erforderlich sind (Tafel 2). Daraus ist erkennbar, daß die Auswahl geeigneter Diagnosemittel bereits Bestandteil der Systemkonzeption sein muß. So ist beispielsweise für die Diagnose zu den EMV-Barrieren ein spezieller Sensor erforderlich. Die Diagnose für die Steuerung erfordert spezielle Vergleicher-Schaltungen und Prüfschaltwerke, die ihren Zustand an andere Baugruppen oder über die Lichtwellenleiter an das Mehrrechnersystem melden.

Für die Ausschaltstromzählung und Fehlerentfernungsbestimmung ist die Erfassung und Speicherung des Kurzschlußstromverlaufs unmittelbar nach Fehlereintritt für wenige Halbwellen notwendig. Die Leittechnik muß also innerhalb von 40 ms auf das Ereignis Kurzschlußbeginn reagieren und die Meßwerte rückwirkend 10 ms vor Kurzschlußbeginn speichern. Die anschließende Auswertung kann als Task niedrigster Priorität erfolgen, da die Reaktionszeit bis zum Vorliegen des Diagnoseergebnisses unkritisch ist.

Die erforderliche Gedächtniszeit wird von den Zeitkonstanten der Prozesse und von der Dauer der Schaltzustände bestimmt. Unter Berücksichtigung der erforderlichen Datenbreite hat die Gedächtniszeit wesentlichen Einfluß auf die Tiefe des Datenspeichers.

4.3. Speichertiefe

Die gesamte Speichertiefe umfaßt neben dem Datenspeicher für Meßwerte, Meldungen, Zählerstände und Vergleichswerte auch den Wissensspeicher in Form der Programme. Die höchsten Anforderungen werden durch die Diagnosemittel für das Elektroenergiesystem gestellt. Der Datenspeicher muß hierfür die elektrischen Parameter für alle Betriebsmittel und Anlagen des Netzes sowie die Netztopologie enthalten, während der Wissensspeicher die Lösung der Differentialgleichungen höherer Ordnung für Netze mit etwa 100 Knoten enthält (Tafel 2). Auch Ratgebersysteme [3] als erste Ansätze für Expertensysteme bei der Fehlerdiagnose können einen großen Wissensspeicher erfordern. Demgegenüber werden z. B. für die Watch-dog-Funktion und für die Taktüberwachung eine minimale Anzahl von Speicherplätzen benötigt.

5. Testmöglichkeiten ausgewählter Diagnosemittel

5.1. CAE-Prüfplatz

Die auf die Leittechnik orientierten Diagnosemittel werden während der Entwicklung der Leittechnik-Baugruppen durch den Hersteller getestet. Dabei werden der Probebetrieb und Dauerbetrieb von Pilotanlagen mit genutzt, um Erfahrungen über die Einstellung von Schwellwerten (Bitfehlerraten, Synchronfehler usw.) auszuwerten und diese Werte gegebenenfalls zu präzisieren.

Die Diagnosemittel für die Energiehauptausrüstungen werden vor dem Netzeinsatz in zwei Stufen getestet. Im ersten Schritt sind Richtigkeit und Genauigkeit der Algorithmen aber auch deren Empfindlichkeit an einem speziellen Rechner-Arbeitsplatz zu über-

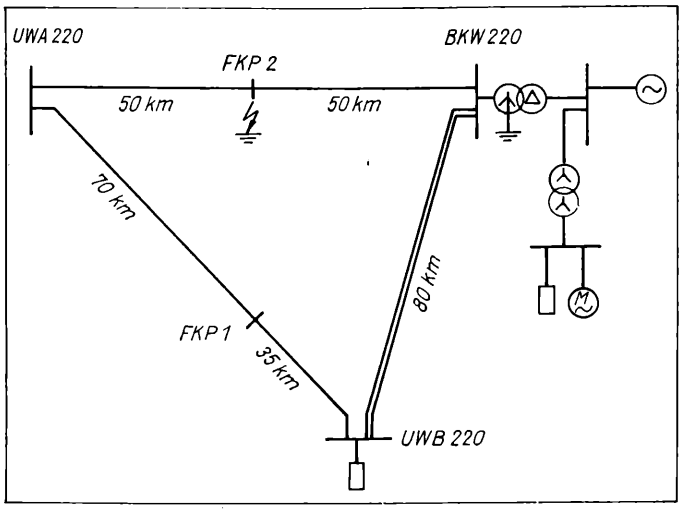


Bild 4. Testnetz für die Fehlersimulation und Berechnung der Strom- und Spannungsverläufe am Relaiseinbauort
UWA, UWB Umspannwerke A bzw. B; BKW Braunkohlenkraftwerk; FKP Fehlerknotenpunkt

prüfen. Dazu werden die erforderlichen Eingabewerte für Zustände oder Ereignisse im Netz am Rechner simuliert. Beispielsweise werden die Algorithmen für die Fehlerentfernungsbestimmung mit Hilfe von Strom- und Spannungsverläufen geprüft, die auf unterschiedliche Art zu ermitteln sind (Bild 3). Zur Überprüfung der logischen Richtigkeit und zum Sensibilitätstest eignen sich besonders synthetische Funktionen, bei denen die Phasenlage, der Oberschwingungsanteil und das Abklingverhalten des Gleichgliedes variiert werden. Durch die Manipulation einzelner Meßwerte (Abtastwerte) wird auch die Empfindlichkeit des Algorithmus bezüglich einzelner unerkannter Meßfehler oder Meßwertverfälschungen getestet.

Für die Prüfung der Genauigkeit eines Algorithmus werden die Strom- und Spannungsverläufe am Meßort mit Hilfe des umfangreichen Programmsystems EMMA [4] zur Berechnung der elektromagnetomechanischen Ausgleichsvorgänge im Modellnetz (Bild 4) oder im ausgewählten realen Netz ermittelt.

Diese zeitlichen Funktionsverläufe für Strom und Spannung bei Fehlereintritt [5] (Bild 5) können anschließend modifiziert werden, um die reale Transformation der in einer Hochspannungsleitung fließenden Fehlerströme auf die durch die Analog-Digital-Umsetzer abtastbaren (nur im Idealfall stromproportionalen) Spannungen zu simulieren. Dabei ist die Sättigung der Stromwandler [6] und der Einfluß von Analogfiltern zu berücksichtigen (Bild 3). Daran anschließend werden mit dem ausgewählten Schutzalgorithmus fortlaufend mit gleitendem Meßwertfenster Reaktanz und Resistanz (Bild 6) berechnet. Durch Vergleich der Genauigkeit der X- und R-Werte und durch Vergleich der Algorithmen untereinander wird der günstigste Algorithmus oder eine vorteilhafte Kombination von Algorithmen für die Anwendung ausgewählt.

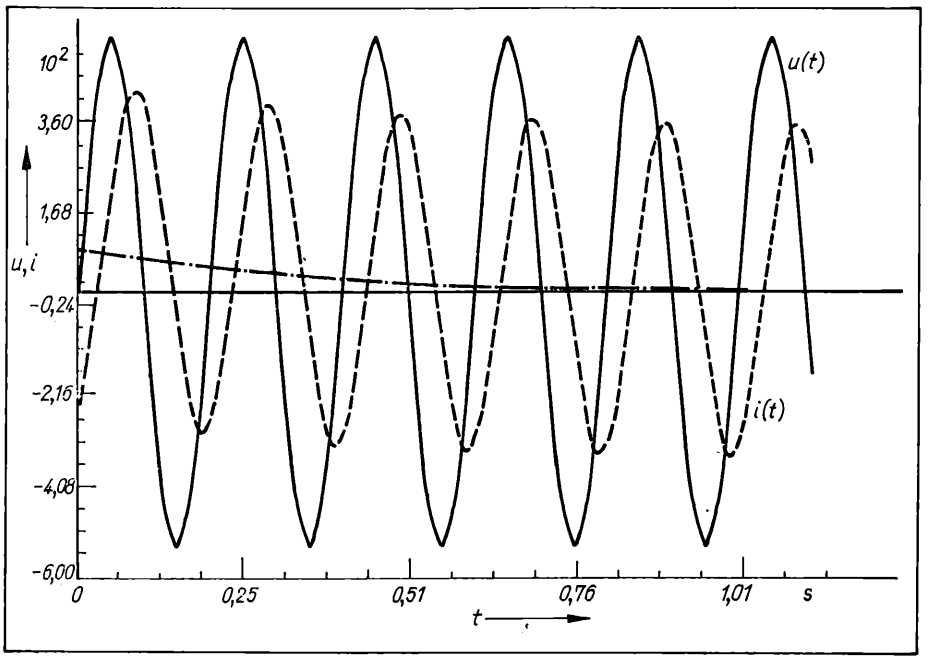


Bild 5. Verläufe u (t) und i (t) am Relaiseinbauort für einen Kurzschluß auf der Freileitung

5.2. Prüfung am Dynamischen Netzmodell

Nach Prüfung und Auswahl der Algorithmen werden im zweiten Schritt die kompletten leittechnischen Baugruppen oder Teilsysteme mit den realisierten Diagnosemitteln an einem Dynamischen Netzmodell getestet. Hierbei besteht der Vorteil, daß in die Prüfung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit außer Algorithmen auch die realen Zwischenwandler, Filter, Übertragungsleitungen und Analog-Digital-Umsetzer sowie das gesamte Echtzeitverhalten des Teilsystems einbezogen werden.

Dabei ermöglicht das Netzmodell die Nachbildung von beliebigen zeitlich gesteuerten Fehlern und Fehlerübergängen (Bild 7). Die Modellmaßstäbe sind so gewählt, daß die Nennparameter des Modells den Nennwerten der üblichen Sekundärkreise in Umspannwerken entsprechen (Tafel 3) [7].

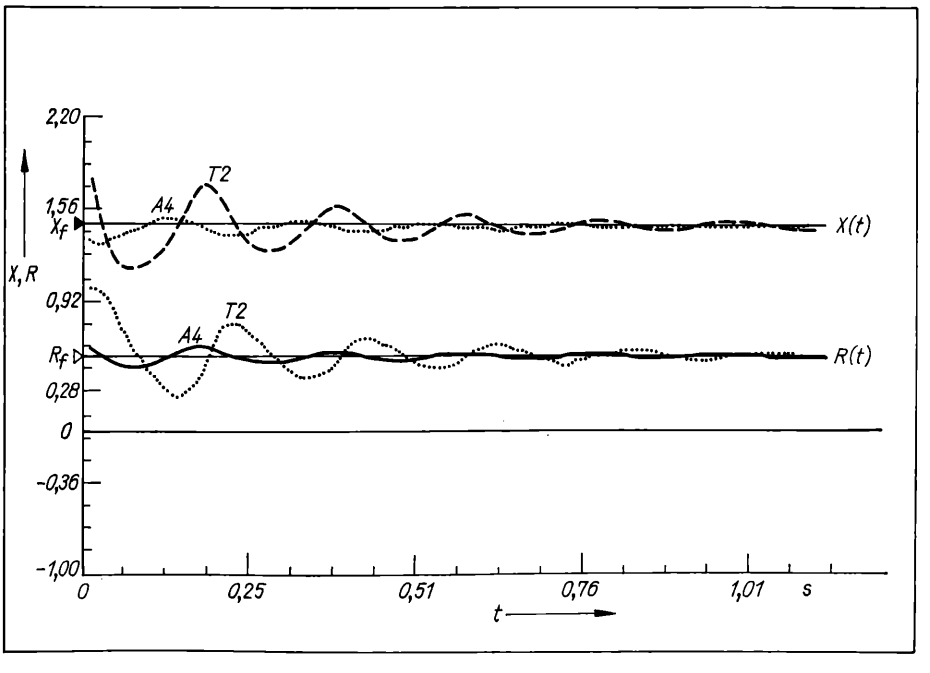


Bild 6. Berechnete Verläufe X (t) und R (t) aus Abtastwerten von Bild 5 nach den Methoden Lobos-A4 und T2
X_f, R_f Tatsächliche Werte von X bzw. R für den ausgewählten Fehlerort

Tafel 3. Modellmaßstabe des Dynamischen Netzmodells (m Maßstab)

Größe	Zeichen	Verknüpfung	Wert
Leistung	m_s	$(= m_u\ m_i)$	1:10000
Spannung	m_u	$(= m_s : m_i)$	1:500
Zeit	m_t		
Strom	m_i	$= m_s : m_u$	1:20
Impedanz	m_z	$= m_s : m_i^2$	1:25
Energie	m_e	$= m_s\ m_t$	1:10000

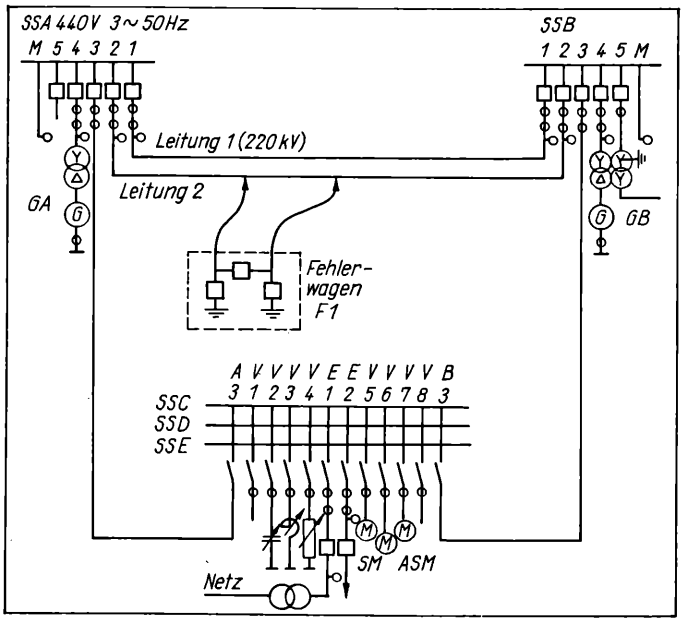


Bild 7. Vereinfachtes Übersichtsschaltbild des Dynamischen Netzmodells der TU Dresden, Sektion Elektrotechnik
A, B Verbindung zur Sammelschiene A bzw, B; ASM Asynchronmaschine als Belastung; E Einspeisefelder; F Fehlerort; GA, GB Generatoren A bzw. B; M Meßfeld; SM Synchronmaschine als Belastung; SSX Sammelmaschine X; V Felder mit Verbraucheranschluß

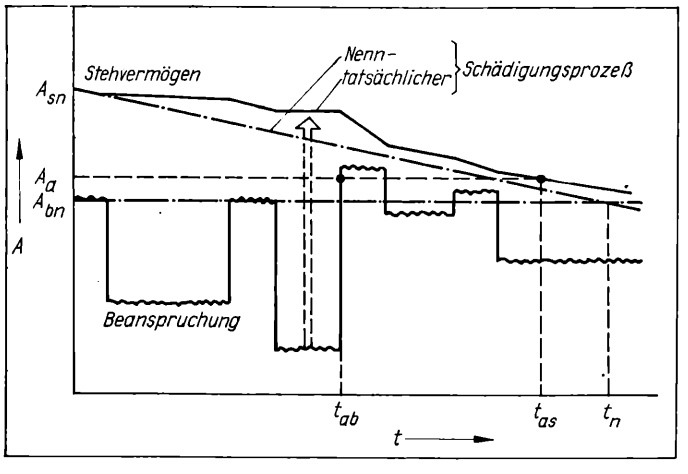


Bild 8. Beispiel für einen von der Beanspruchung abhängigen Schädigungsprozeß
A_a Diagnose-Ansprechwert (empirisch ermittelter Ansprechwert bei unbekanntem Schädigungsprozeß); A_{bn} Nennbeanspruchung; A_{sn} Nennstehvermögen; t_a Ansprech-Zeitpunkt; t_n normative Nutzungsdauer
—·— Nenn-Schädigungsverlauf und Nennbeanspruchung
·····) zu bestimmender Algorithmus für die Abhängigkeit der Schädigung von der Beanspruchung

6. Ausblick

Die vorteilhaften Möglichkeiten bei der vielseitigen Verwendung von Meßwerten und Meldungen durch die mikrorechnergestützte Leittechnik führen zu einer zunehmenden Integration bekannter und neuer Diagnosemittel für die Energiehauptausrüstungen. Dabei wird infolge der Informationsverarbeitung auf der Grundlage frei programmierbarer Algorithmen deren Kompliziertheitsgrad nur durch den Speicherbedarf und die Echtzeitanforderungen begrenzt.

Diese Entwicklung wird auch auf eine Weiterentwicklung der Grundlagenforschung rückwirken. Ziel ist dabei die Berechnung der differentiellen Schädigung aus der momentanen Belastung des Betriebsmittels. Damit kann aus der ständigen Beobachtung der Belastung der Schädigungsprozeß berechnet und aus dem Vergleich mit der Beanspruchung der zu erwartende Zeitpunkt für den Fehler bestimmt oder über eine Steuerung der Belastung dieser Fehler vor Ablauf der normativen Nutzungsdauer vermieden werden (Bild 8). So wird die Aussageschärfe dieser Diagnose, verglichen mit der Beobachtung eines empirisch ermittelten Schwellwertes für die Beanspruchung oder für die Festigkeit, wesentlich erhöht, wobei auch die Beobachtung eines Festigkeitswertes bereits einen speziellen Sensor erfordert. Des weiteren ist auch die Ursachenforschung bei Fehlern eine Voraussetzung für die Orientierung der Diagnosemittel auf Hauptausfallursachen.

Da die Diagnose als leittechnische Funktion sowie besonders die Steuerung und Überwachung eine hohe Zuverlässigkeit dieser Leittechnik voraussetzen, sind gleichzeitig die Diagnosemittel für die Leittechnik selbst weiterzuentwickeln.

Das Hauptziel der Diagnose ist eine hohe Zuverlässigkeit der Elektroenergieversorgung, demzufolge die ständige Verbesserung von Werkstoff und Konstruktion nicht vernachlässigt werden dürfen. Vielmehr ist die Sicherung einer hohen Ausgangszuverlässigkeit eine wesentliche Voraussetzung für die wirkungsvolle Diagnose.

Die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen an die Leittechnik zwingen zur Vermeidung von Überlastungen bei ihrem Einsatz, so daß die Integration von Diagnosemitteln schrittweise erfolgt. Somit wird die Bedeutung von transportablen und manuell bedienbaren Diagnosegeräten in den nächsten Jahren nicht wesentlich eingeschränkt.

Literatur

[1] *Böhme, H.; Großmann, S.; Alicke, M.:* Zur Stromüberlastbarkeit elektrotechnischer Betriebsmittel. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 10, S. 377–381

[2] *Bauer, H.:* Entscheidungskriterien für die Entwicklung und für den Einsatz von mikrorechnergestützter Prozeßleittechnik für Umspannwerke. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 11, S. 405–409

[3] *Hein, F.:* Expertensystem für die Ereigniserkennung im Netzbetrieb. etz-Archiv 11 (1989) 4, S. 125–130

[4] *Pundt, H.; Erlich, I.:* Berechnung elektromagnetomechanischer Ausgleichsvorgänge in Elektroenergiesystemen. Energietechnik, Leipzig 38 (1988) 8, S. 303 bis 306

[5] *Lau, B.:* Berechnung elektromagnetischer und elektromagnetomechanischer Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem. Dissertation A. TU Dresden 1987

[6] *Radman, T. M.:* Das Übertragungsverhalten des Stromwandlers bei Kurzschlußströmen im transienten Betrieb. Bericht 726/88 des WB Elektroenergietechnik der Sektion Elektrotechnik. TU Dresden 1988

[7] Bedienungsanleitung für das Dynamische Netzmodell. TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, WB Elektroenergietechnik

[8] *Bauer, H.; Gnüchtel, K.; Leucke, O.; Schindler, J.:* Integration of diagnostic into microcomputer aided process control. 10 CIRED, Brighton (8. bis 12. Mai 1989) Progress report

[9] *Bauer, H.:* Data use within microcomputer based substation control systems for diagnostics and maintenance of the main power equipment. CIGRE-Symposium „Digital technology in power systems", Bournemouth (12. bis 14. Juni 1989) Progress report

[10] *Müller, O.; Gorgius, D.:* Technische Diagnostik als ein Mittel zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des Elektroenergiesystems. Energietechnik, Leipzig 39 (1989) 2, S. 41–45

[11] *Räppold, J.:* Von der turnusbestimmten zur zustandsbezogenen Instandhaltung – Entwicklung der technischen Diagnostik. das verbundnetz, Berlin 23 (1988) 45, S. 1101–1104

[12] *Noack, F.*, u.a.: Computer aided diagnostic system for high voltage circuitbreakers. CIGRE, Paris (1988) paper 13–10

EA 6069

Gleichrichtervergleich vom Standpunkt der Energieabnahme

L. Kule, Plzen, ČSSR

Das Maß der Qualität der Elektroenergieabnahme ist der Leistungsfaktor λ, der auch als echter Leistungsfaktor bekannt ist. Er charakterisiert drei ungünstige Einflüsse:

a) den Spannungsabfall in der induktiven Netzreaktanz,
b) die Deformationen der Spannungskurve, verursacht durch die Stromoberwellen,
c) die vergrößerten Verluste in den Speisenetzen.

Nachfolgend wird der dritte ungünstige Einfluß — die Verluste im Speisenetz — betrachtet. Das Ziel ist es, einige Typen einphasiger Gleichrichter zu vergleichen. Der Leistungsfaktor λ charakterisiert die Verluste im unbekannten Widerstand R der Zuführungsleitung. Die gegebene Leistungsaufnahme

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \tag{1}$$

(Index 1 drückt aus, daß es sich um die Hauptharmonische handelt) kann man bei der gegebenen Spannung U_1 optimal, das heißt mit geringen Leistungsverlusten in der Speiseleitung, abnehmen. Mindestverluste entstehen in der Zuleitung, wenn der Strom $I_{1\,OPT}$ ohne Harmonische und in Phase mit der Spannung ist. Offensichtlich gilt:

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_1 I_{1\,OPT}. \tag{2}$$

Im unbekannten Leitungswiderstand R entstehen die tatsächlichen Verluste

$$\Delta P = R I_{ef}^2 \tag{3}$$

oder bei optimaler Leistungsentnahme

$$\Delta P_{OPT} = R I_{1\,OPT}^2. \tag{4}$$

Das Verhältnis ist

$$\frac{\Delta P_{OPT}}{\Delta P} = \frac{I_1^2 \cos^2 \varphi_1}{I_{ef}^2} = \lambda^2. \tag{5}$$

Der Leistungsfaktor λ zeigt das Verhältnis der optimalen ΔP_{OPT} zu den aktuellen Verlusten ΔP. Je kleiner der Leistungsfaktor ist, um so größer sind die reellen Verluste im Vergleich zu den optimalen Verlusten. Diese Tatsache dient zum einfachen Vergleich verschiedener Verbraucher hinsichtlich der Speiseleitungsverluste.
Beispiel: Einphasiger Gleichrichter in halbgesteuerter Brückenschaltung. Es wäre optimal

$$U_d I_d = U_1 I_{1\,OPT} = U_1 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} I_d. \tag{6}$$

Nach Einführung des Spannungssteuerfaktors

$$k_u = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \tag{7}$$

erhält man

$$\lambda^2 = \frac{\Delta P_{OPT}}{\Delta P} = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)^2 k_u^2 \frac{\pi}{\pi - \alpha} \tag{8}$$

bzw.

$$\lambda^2 = \frac{8}{\pi^2} k_u^2 \frac{\pi}{\pi - \arccos(2k_u - 1)}. \tag{9}$$

So erhält man den Leistungsfaktor λ als Funktion des Spannungssteuerfaktors k_u. Im Bild 1 sind Kurven der Gleichspannungen u_d und der Wechselströme $i_\sim$ verschiedener Gleichrichter und auch die zuständigen Leistungsfaktorkennlinien $\lambda(k_u)$, wie oben gezeigt wurde, vereinfacht dargestellt. Dieselbe Methode wurde auch auf komplexere Gleichrichter mit zwei Halbbrückenschaltungen mit stufenweiser Steuerung (Kurve f) und auf Gleichrichter mit zwei Brückenschaltungen mit stufenweiser Sektorsteuerung (Kurve g) angewendet.

Verbesserte Bewertung der Gleichrichter

Der Leistungsfaktor λ gibt die Information über die relativen Verluste in unbekannten Widerständen der Zuleitung. Aus den Kennlinien — Bild 1 a) — geht hervor, daß bei niedrigen Gleichspannungen der Leistungsfaktor λ klein ist. Dabei nimmt der Verbraucher, z. B. ein Elektroantrieb, nur niedrige Leistung ab und in unbekannten Widerständen entstehen niedrige Verluste. Deshalb wäre es vorteilhaft für den Vergleich der Gleichrichter hinsichtlich der Vor- oder Nachteile der Leistungsabnahme die tatsächlichen Verluste zu bestimmen. Das ist aber in absoluten Werten unmöglich, da der Leitungswiderstand unbekannt ist. Deshalb wird empfohlen, statt des Leistungsfaktors λ den relativen Verlustfaktor $\varkappa$ zu benutzen Er ist durch

$$\varkappa = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \tag{10}$$

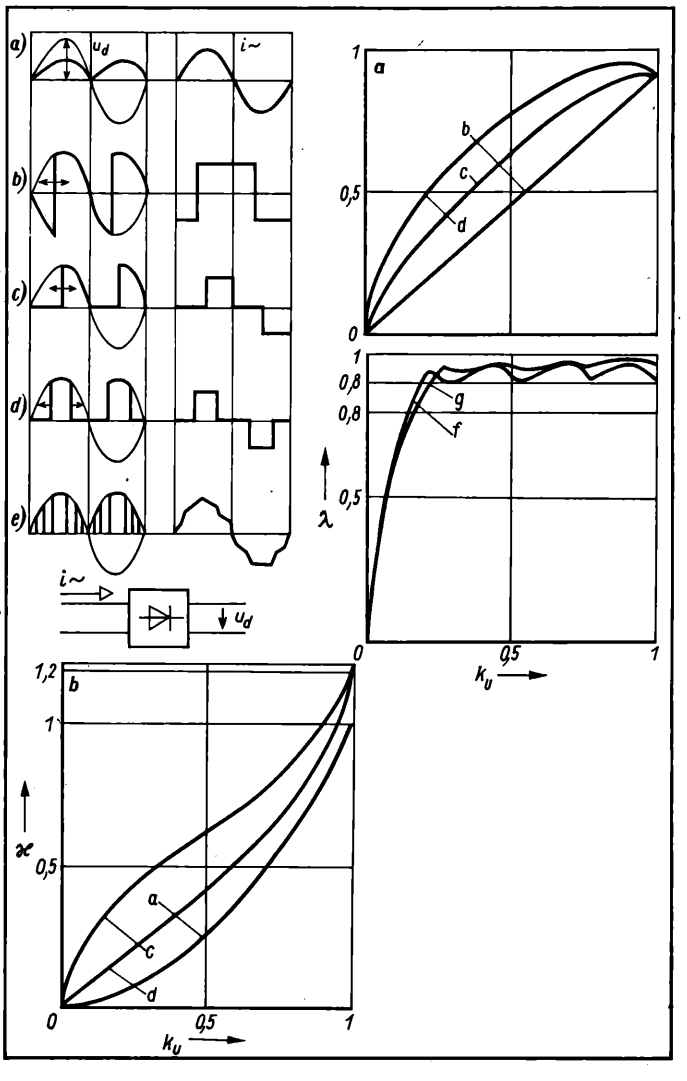
definiert, wobei ΔP die aktuellen Verluste bei gegebener Steuerung und Belastung des Gleichrichters und ΔP_{ref} die Referenzverluste sind. Für günstige Referenzverluste wurden z. B. die Verluste bei $k_u = 1$ (Gleichrichter auf Nennspannung gesteuert) und bei $k_i = 1$ (der Antrieb nimmt den Nennstrom ab) gewählt. Dabei entstehen die Verluste ΔP_{ref}, wenn der Gleichrichter optimal das Netz belastet. Daraus folgt:

$$\varkappa = \frac{\Delta P}{\Delta P_{OPT}} \frac{\Delta P_{OPT}}{\Delta P_{ref}} = \left(\frac{k_i}{\lambda}\right)^2 k_u^2. \tag{11}$$

Die Kennlinien $\varkappa(k_u)$ bei $k_i = 1$ für die Gleichrichter a) bis d) sind in der linken Seite des Bildes 1 dargestellt.

EA 6030

Bild 1. a) Wechselstromseite gesteuert; b) Anschnittsteuerung (Vollbrücke); c) Anschnittsteuerung (Halbbrücke); d) Sektorsteuerung; e) Pulsbreitsteuerung; f) Vierzonenanschnittsteuerung; g) Vierzonensektorsteuerung



Doc. Ing. *Lumír Kule*, CSc., ist Mitarbeiter an der TH Plzen, ČSSR

TAGUNGSBERICHT

Bürstenlose Drehstromantriebe

299. Elektrotechnisches Kolloquium der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden am 6. September 1989

Referent: Dr.-Ing. *A. Läuger*, Elektro-Maschinenbau GmbH, Göppingen Faurndau, BRD

Der Referent erläuterte zunächst das Wirkprinzip des drehfelderregten Stromrichtermotors. Bedingt durch die läuferseitige Erregung mit einer dreiphasigen 50-Hz-Wechselspannung ist die Fremdkommutierung des maschinenseitigen Stromrichters auch im Stillstand gewährleistet. Die Läuferflußverkettung ist ohne besondere Maßnahmen konstant. Daraus ergibt sich ein günstiges Betriebsverhalten, obwohl nur einfache primär- und sekundärnetzgelöschte Stromrichter eingesetzt werden. Vierquadrantenbetrieb ist möglich.
Weitere Vorteile ergeben sich daraus, daß ein Drehzahl-Istwertsignal aus der Ständerfrequenz des Motors abgeleitet werden kann, also keine Tachomaschine zur Drehzahlmessung benötigt wird. Das in der Maschine wirkende Drehmoment kann aus den elektrischen Eingangsgrößen des Motors relativ genau berechnet werden. Darauf baut ein Drehmomentregelkreis auf. Eine Drehmomentmeßwelle ist nicht notwendig.

Das Wirkprinzip, das ursprünglich mit einem Asynchronmotor mit Schleifringläufer erprobt wurde, ist auch mit einer bürstenlosen Maschine zu verwirklichen, die einer Maschinenkaskade entspricht. Diese Maschine trägt in einem Gehäuse zwei Blechpakete. Die Ständerwicklungen werden vom Netz eingespeist. Die Läuferwicklungen sind elektrisch verbunden, wobei die Drehfeldrichtung in beiden Läufern entgegengerichtet ist.
Abschließend stellte der Referent Anwendungsbeispiele vor. Das Antriebsprinzip wurde im Leistungsbereich von 10 bis 100 kW, im Einzelfall auch für 600 kW angewandt. Der Schutzgrad IP 44 ist problemlos zu realisieren.
Besonders interessant ist die Anwendung in schwer anlaufenden Antrieben und als Belastungsmaschine für Verbrennungsmotoren in Prüfständen. Einer neueren Entwicklung folgend werden Transputer als Drehmomentrechner und für Regelungsaufgaben eingesetzt.

R. Schönfeld, Dresden EK 4062

Literatur

[1] *Läuger, A.:* Der drehfelderregte Stromrichtermotor. Diss. Universität Stuttgart 1985

KURZBERICHTE

Flexibles Gerätesystem zur Klebstoffverarbeitung

Die Verarbeitung von Klebstoffen erfolgt in der Industrie im wesentlichen manuell (etwa 80%). Die Anwendungsprobleme der Industrie reichen von einfachen Aufgaben, wie dem Auftragen von Einkomponenten-Klebstoffen, bis hin zu automatisierten Verarbeitungsanlagen für Mehrkomponenten-Klebstoffe. Um die angesprochenen Probleme ökonomisch sinnvoll lösen zu können, ist im ZIS Halle, Abt. Rationalisierung Berlin, ein flexibel zusammenstellbares Gerätesystem zur Verarbeitung von flüssigen Ein- bzw. Mehrkomponenten-Klebstoffen (ohne Füllstoffe) entwickelt worden. Das Gerätesystem soll zu einer Verbesserung der Qualität der Klebstoffverarbeitung führen. Einkomponenten-Klebstoffe erfordern zur Verarbeitung Vorratsbehälter und Düsen (entsprechend den Anwenderforderungen).
Zwei- und Mehrkomponenten-Klebstoffe benötigen zusätzliche Vorrichtungen zum Mischen entsprechend dem erforderlichen Mischungsverhältnis.
Das flexible Gerätesystem umfaßt folgende Baueinheiten: Vorratsbehälter, Reinigungsbehälter, Statischer Mischer, Dynamischer Mischer, Dosierventil für niedrig- bzw. hochviskose Klebstoffe, Baustein zur Innenbeschichtung, Handhabungsgerät zur Mechanisierung (Pistole).
Das Gerätesystem ermöglicht die Konzipierung und den Bau von den Anwenderforderungen angepaßten Ausbaustufen von Klebstoffverarbeitungsgeräten ohne lange Entwicklungszeiten.
Durch Nutzung des Gerätesystems sind folgende Effekte zu erzielen:

— Verkürzung der Entwicklungszeiten für Klebstoffverarbeitungsgeräte um 40%

— Verringerung der Kosten für Auftraggeber bei der Entwicklung von Klebstoffverarbeitungsgeräten

— Erhöhung der Sicherheit der Geräte durch Anwendung erprobter Varianten

— Zusammenarbeit mit vorhandenen Automatisierungsanlagen bzw. Robotern möglich

— Nutzung von Modulen auch außerhalb der Klebtechnik möglich.

Durch die Ablösung von bisher manueller Klebstoffverarbeitung kann der Mechanisierungs- bzw. Automatisierungsgrad beim Kleben erhöht und die Arbeitsproduktivität bei klebtechnischen Prozessen gesteigert werden. Durch die Anwendung meist geschlossener Systeme tritt eine wesentliche Verbesserung der Arbeitsbedingungen und Verringerung der Umweltbelastung (kein Hautkontakt, wesentliche Verminderung der Abgabe von Lösungsmitteldämpfen u.ä.) auf. Die Nutzung des Gerätesystems wird im ZIS im Rahmen von Industrieforschung bei Entwicklung und Bau von Klebstoffverarbeitungsgeräten sowie beim Mehrfachnachbau der entstandenen Funktionsmuster in Betrieben erfolgen.

Anfragen an
Zentralinstitut für Schweißtechnik
der DDR, Halle (Saale)
Abt. Rationalisierung Berlin
Arbeitsgruppe 705
Wackenbergstr. 84—88, Berlin, 1110.
P. Möller; P. Schöne, Berlin EK 4052

Bewertung der Elektrosicherheit elektrotechnischer Anlagen und eine Einführung in die Theorie der Elektrosicherheit

Unter dieser Thematik stand das 4. Wissenschaftliche Kolloquium „Elektrosicherheit elektrotechnischer Anlagen" an der Technischen Hochschule Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen.

Die vom Berichterstatter zusammengefaßte Darstellung ist im Heft 9/1988 der Wissenschaftlichen Berichte der Technischen Hochschule Leipzig als Manuskript veröffentlicht. Das Heft umfaßt 105 Seiten mit einschließlich 35 Bildern und enthält folgende Komplexe:

— Probleme und Zielstellung

— Ablauf einer Sicherheitsbewertung

— Das Gefährdungsgrundmodell

— Verfahren zur komplexen mathematischen Bewertung der Elektrosicherheit elektrotechnischer Anlagen mit Hilfe objektiver Wahrscheinlichkeiten

— Verfahren zur komplexen mathematischen Bewertung der Elektrosicherheit elektrotechnischer Anlagen mit Hilfe subjektiver Wahrscheinlichkeiten

— Klassifikation und Applikationsvarianten als Entscheidungshilfe

— Anwendungs- und Erläuterungsbeispiele.

Dieser 1. Entwurf ist eine Zusammenfassung der bisherigen Forschungsergebnisse und soll als Lehrmaterial für das geplante Postgradualstudium „Sicherheitstechnik elektrotechnischer Anlagen" und für die zukünftige fachspezifische Ausbildung an der Sektion Elektroenergieanlagen genutzt werden. Weiterhin dient sie als Basismaterial für die weiterführende applikative Forschung, vor allem auf dem Gebiet der Sicherheit von Kernkraftwerken.

S. Altmann, Leipzig EK 3020

Zusammenarbeit zwischen ASMW und DIN

Das Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW) und das Deutsche Institut für Normung (DIN) haben Anfang Oktober eine Vereinbarung über die Zusammenarbeit auf den Gebieten Standardisierung und Zertifizierung unterzeichnet.
Inhalt der Vereinbarung ist der Informations- und Dokumentationsaustausch zu den zentralen Aktivitäten der nationalen und internationalen Standardisierungsorganisationen, die Schaffung von Voraussetzungen für die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen und Zertifikaten, die Organisation des direkten Datenaustausches sowie die gegenseitige Nutzung von Arbeitsergebnissen. (ADN/EL)

AUS ANDEREN ZEITSCHRIFTEN

Die dänische Windenergetik

Energija (1987) 5, S. 61 (Notiz)

Dänemark ist das führende Land im Bau und Betrieb von Windkraftwerken. Heute sind dort ungefähr 1400 Windkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 60 MW in Betrieb. Mehr als 1000 von ihnen sind an das öffentliche Netz angeschlossen. Von den Windkraftwerken wird ungefähr 1% des Elektroenergieverbrauchs Dänemarks abgedeckt. Die Regierung Dänemarks stellt das Ziel, bis zum Jahre 2000 10% der Elektroenergie in Windkraftwerken zu erzeugen. In den nächsten fünf Jahren sollen Windkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 100 MW in Betrieb gehen. Gegenwärtig produziert die dänische Industrie serienmäßig, vorrangig dreiflüglige Windkraftwerke. Im Jahre 1985 exportierte Dänemark 3000 Windkraftwerke in der Leistungsgröße von 50 bis 100 kW.

E. Broßmann, Berlin EK 2690

Dispatcherratgeber für Wirkleistungsflüsse

Ornov, V. G., u.a.: Elektriceskie stancii (1988) 5, S. 11—15

Ein wichtiger einzuhaltender Parameter in großen Elektroenergiesystemen (EES) sind die Größen der Wirkleistungsflüsse über bestimmte Leitungen bzw. mehrere Leitungen eines Abschnittes. Die auf der Grundlage von Großrechnern bis Bürocomputern entwickelten Ratgeber geben den Dispatcher Handlungsstrategien zur Verminderung der Wirkleistungsflüsse auf zulässige Werte vor, beispielsweise mit Pumpspeicherwerken.

Der für die Zentrale Dispatcherverwaltung der UdSSR entwickelte Ratgeber hat folgende Merkmale: Die Eingabe der Fernmeßdaten erfolgt automatisch. Die Berechnung der Leistungsflüsse auf dem Minirechner EC-1011 wird mit einem vereinfachten, zuverlässig konvergierenden Programm auf der Grundlage von Linearmodellen realisiert. Der Dispatcher steht mit dem Rechner über ein Display direkt im Dialog.

Es sind zwei schnellwirkende Maßnahmen zur Einflußnahme auf die Wirkleistungsflüsse vorgesehen: Turbinenleistungsänderung von Wasserkraftwerken und Lastabwurf bei ausgewählten Verbrauchern. Zwecks Vermeidung des gleichzeitigen Aufrufs mehrerer Maßnahmen für verschiedene Netzknoten, die dann nicht gleichzeitig realisiert werden könnten und dadurch das angespannte Regime kurzzeitig noch weiter belastet wäre, werden die einzelnen knotenpunktbezogenen Maßnahmen schrittweise ermittelt, wobei die effektivste Maßnahme an erster Stelle ausgegeben wird.

Das Ratgeberprogramm ist für 64 Knoten, 120 Leitungen sowie jeweils 24 Kraftwerke und 24 Verbraucher zu Regelzwecken ausgelegt. Die Rechenzeit liegt zwischen 10 s und 2 min. Der Dispatcher kann direkt über das Display die aktuellen zulässigen Wirkleistungsflüsse und Frequenzen sowie die Regelobjekte verändern. Das Ergebnis erscheint in Tabellenform oder als Schema auf dem Display.

Das Ratgebersystem kann auch für Trainingszwecke effektiv genutzt werden.

E. Broßmann, Berlin EA 2865

Die Elektroenergetik in den USA 1986

Faibisovič, D. L.: Energochosjaistvc sa rubeshom (1988) 1, S. 35—37

Im Jahre 1986 stieg der Elektroenergieverbrauch im Vergleich zum Vorjahr um 2%. Die höchsten Zuwachsraten hatten kleine Betriebe, Handelseinrichtungen und die Haushalte zu verzeichnen. Gleichzeitig fiel der Elektroenergieverbrauch der Großbetriebe. Erstmals war der Gesamtverbrauch der amerikanischen Haushalte höher als der der Großindustrie.

Die Gewinne der amerikanischen Energiegesellschaften betrugen 1986 153 Milliarden Dollar und lagen damit um 3 Milliarden über den vorjährigen. Die Elektroenergietarife wuchsen auf allen Gebieten außer der Großindustrie weiter an, wobei der Tarifzuwachs der Haushalte den mittleren um das Zweifache übertraf. Der mittlere Elektroenergietarif in den USA beträgt 7,44 Cent/kWh.

Seit 1982 verringern sich die Investitionen in der Elektroenergetik ständig, wobei lediglich in den Verteilungsnetzen ein Zuwachs zu verzeichnen ist. Im Jahre 1986 sind 20700 MW Kraftwerksleistung in Betrieb gegangen, davon 13000 MW Kernkraftwerke und 3600 MW traditionelle Wärmekraftwerke. Die im Jahr der Tschernobylhavarie in Betrieb genommene Kernkraftwerksleistung in den USA übertraf die vorjährige (8700 MW) bedeutend. Die installierte Kraftwerksleistung der USA betrug am 1. April 1987 709100 MW, darunter Wasserkraftwerke mit 85193 MW (12%), Wärme- einschließlich Geothermalkraftwerke 474063 MW (66,9%), Kernkraftwerke 93182 MW (13,1%), Dieselkraftwerke 5007 MW (0,7%) und Gasturbinenkraftwerke 51649 MW (7,3%). Die mittleren Investitionskosten für Kernkraftwerke betrugen 985 Dollar/kW und für traditionelle Wärmekraftwerke 1420 Dollar/kW. 1987 sollen 21000 MW Kraftwerksleistung in Betrieb genommen werden. 1986 verringerte sich erstmals seit vier Jahren die Elektroenergieerzeugung auf Kohle- und Erdgasbasis und die auf Erdölbasis stieg an.

E. Broßmann, Berlin EA 2831

Elektroenergiesysteme mit Gleichstromsektionierung ja oder nein?

Magdai, I.: Elektricestvo (1988) 1, S. 84 bis 86

Der weitere Ausbau des Einheitlichen Elektroenergiesystems der Sowjetunion wird in zwei grundsätzlichen Richtungen diskutiert: ein durchgängiges Wechselstromsystem mit gleicher Frequenz von Wladiwostok bis Berlin oder Sektionierung dieses Systems mit Hochspannungs-Gleichstromleitungen (HGÜ) oder Gleichstromkurzkupplungen (HGK).

Die Hauptschwierigkeit für den synchronen Betrieb solcher riesiger Elektroenergie-Wechselstrom-Systeme sind die Stabilitätsprobleme, die beispielsweise komplizierte Schnittautomatiken zur Trennung des Gesamtsystems in Havariesituationen zwecks Vermeidung des Stabilitätsverlustes großer Teile bzw. des ganzen Systems erforderlich machen. Anhand der HGK Wyborg zwischen der Sowjetunion und Finnland, das zusammen mit Schweden und Norwegen dem Energiesystem Nordel angehört, und der in der Projektphase befindlichen HGK Polessk zwischen der Sowjetunion und der VRP werden die Vorteile der HGK dargelegt. Über die HGK Wyborg werden bis zu 600 MW Grundlast von der Sowjetunion nach Finnland exportiert, und diese HGK kann über einen längeren Zeitraum maximal mit 1000 MW belastet werden. Ein weiteres Ansteigen des Leistungsflusses über die HGK wird von dem Regelsystem der HGK verhindert. Bei einem Ausfall von 1500 MW Kraftwerksleistung im Energiesystem Nordel, wo durch die sich einstellende Frequenzabsenkung bis zu den Ansprechwerten der AFE (Automatische Frequenzentlastung) etwa 900 MW Leistungsausfall kompensiert werden können, wären lediglich 200 MW Verbraucherabschaltungen durch die AFE zu beklagen (1500 MW = 400 MW zusätzlich über HGK + 900 MW Frequenzkompensation + 200 MW AFE-Versorgungsausfall). Bei einer billigeren Wechselstromleitung mit der gleichen Durchlaßfähigkeit (1000 MW) würde schon beim Ausfall von 500 MW Kraftwerksleistung im Energiesystem Nordel diese Leitung auslösen (600 MW Grundlieferungen + 500 MW Ausfall > 1000 MW) und bereits 200 MW Versorgungsausfall eintreten (500 MW = 900 MW Frequenzkompensation + 200 MW AFE-Versorgungsausfall — 600 MW Planlieferungen aus der Sowjetunion). Damit leistet die HGK auch einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Elektroenergieversorgung der skandinavischen Länder.

Der volkswirtschaftliche Verlust durch die herkömmlichen Wechselstromleitungen wird am Beispiel der Verbindung zwischen dem Energiesystem Süden der UdSSR und den Partnerländern (UVR, SRR, VRP, ČSSR, DDR und VRB) deutlich. Im Jahre 1986 traten infolge von Wirkleistungsstößen auf die 750-kV-Zwischensystemleitungen in die RGW-Länder 73 automatische Trennungen ein, durch die nicht selten 1000 bis 1500 MW Versorgungsausfall (AFE-Auslösungen in den Partnerländern) zu verzeichnen war. Bei einer mittleren Wiederaufnahmezeit des Parallelbetriebs nach 2 h und einem niedrig angesetzten Versorgungsausfallverlust von 1 Rubel/kWh ergibt sich ein jährlicher Verlust für die RGW-Länder von mindestens 150 Millionen Rubel. Andererseits erhalten die großen Energieblöcke der Elektroenergiesysteme Süden bei jeder Trennung einen Leistungsstoß von mindestens 2000 bis 2500 MW. Nach drei bis vier derartigen Beschleunigungsphasen müssen die Blöcke repariert werden, womit die ständig um 15 bis 20% niedriger liegende Verfügbarkeit der Großkraftwerke des Energiesystems Süden der UdSSR zum

Landesdurchschnitt mit entsprechend höheren Brennstoffverbrauch (Einsatz von mittleren und kleinen Kraftwerken) erklärt werden kann.
Außerdem ist die Regelautomatik für den gesteuerten Schnitt mit HGÜ oder HGK um vieles billiger und zuverlässiger als die adaptiven leistungsbilanzierenden Schnittautomatiken der Wechselstromsysteme.

E. Broßmann, Berlin EA 2802

Horizontales Windkraftwerk in Großbritannien

Energija (1987) 4, S. 15 (Notiz)

Ende November 1986 ging am Ufer der Bucht von Camarthen (Bristolkanal) ein neuartiges Windkraftwerk in Betrieb. Dort drehen sich die Flügel um eine vertikale (nicht horizontale) Achse. Solch ein System ist von der Windrichtung unabhängig, und es sind gleichfalls keine teueren Geber und Kontrollapparaturen für den Überdrehzahlbereich notwendig. Wenn die Windgeschwindigkeit kritische Werte für den sicheren Betrieb der Anlage erreicht, bewirkt eine Fliehkraftregeleinrichtung das automatische Umklappen der Flügel.
Die volle Leistung des Windkraftwerkes beträgt 130 kW, was für die Versorgung von etwa 100 Haushalten mit Elektroenergie ausreicht. Diese Leistung wird jedoch nur bei Windgeschwindigkeiten von 7 m/s und darüber erreicht. Die mittlere Windgeschwindigkeit am Standort liegt in der Größenordnung von 6,7 m/s.
Die Erprobung dieses neuartigen Windkraftwerkes soll zwei Jahre unter Aufsicht der Kernenergiebehörde Großbritanniens verlaufen. Bei guten Ergebnissen soll ein bedeutend leistungsstärkeres Windkraftwerk dieser Art in Auftrag gegeben werden.

E. Broßmann, Berlin EA 2689

Wasserführende Schichten in porösen Gesteinen als Wärmespeicher

Voronkow, M. E.; Peredi, A. D.: Elektriceskie stancii (1987) 8, S. 42—44

In letzter Zeit wächst das Interesse an der Nutzung unterirdischer stehender wasserführender Schichten als Wärmespeicher, wie es schon in den USA, der BRD, in Schweden und in anderen Ländern vereinzelt praktiziert wird. Der Hauptvorteil dieser Speicher liegt in ihren relativ geringen Investitionskosten.
Solch ein Wärmespeicher an einem Wärmekraftwerk wird folgendermaßen betrieben: Jede unterirdische Speicherzone ist mit zwei Rohren an das Wärmeschema des Kraftwerkes angebunden. Beim Laden wird das hochgepumpte kalte Wasser in den Niederdruckvorwärmern der Turbine erhitzt. Das erwärmte Wasser gelangt dann über den „heißen" Rohrstrang in die wasserführende Schicht zurück. Dort erhitzt es das poröse Gestein. Dieser Prozeß wird bis zum Erreichen der vorgesehenen Speichertemperatur von 120 °C fortgesetzt. Beim Entladen gibt das hochgepumpte heiße Wasser über einen Wärmeaustauscher seine Energie an das angeschlossene Wärmenetz ab, wodurch von der Turbine keine Wärmeenergie abgegeben werden muß und ausschließlich Elektroenergie erzeugt wird. Bei großen Speichern können hundert und mehr Rohrpaare notwendig werden.
Die technisch-ökonomische Analyse ergab, daß diese Speicher im Zusammenwirken mit Kernkraftwerken äußerst vorteilhaft sind. Die relativ niedrigen Investitionskosten dieser Speicher im Vergleich mit den verbreiteten Pumpspeicherwerken und anderen Wärmespeichern ermöglichen erstmals die Problematik der saisonmäßigen Wärmespeicherung parallel mit der Tagesgangregelung real in die weiteren Betrachtungen einzubeziehen, was ja die bisherigen Speicher im Elektroenergiesystem nicht ermöglichen können.
Die nächsten Aufgaben in Richtung Bau des ersten großen derartigen Wärmespeichers bestehen in der geologischen Erkundung wasserführender Schichten im Einzugsgebiet konkreter Kernkraftwerke, wobei der Einsatz jener Wärmespeicher bei Sonnenenergieanlagen und in zentralen Wärmeversorgungssystemen ebenfalls ökonomisch sehr günstig erscheint.

E. Broßmann, Berlin EA 2694

Energetik und das Klima der Erde

Legasov, V. A.; Kusmin, I. I.: Energija (1988) 1, S. 18—23

Auf der 7. Tagung der internationalen Kommission für Umweltprobleme im Dezember 1986 in Moskau sind folgende Entwicklungsperspektiven für das Klima und die Energetik prognostiziert worden:
Es kann davon ausgegangen werden, daß im Jahre 2010 die Weltbevölkerung 10 Milliarden Menschen zählen und sich im weiteren auf dem Niveau von 10 bis 12 Milliarden stabilisieren wird. Die Energieerzeugung aus organischen Energieträgern wird bis Mitte des nächsten Jahrhunderts anwachsen und den doppelten Umfang von heute erreichen. Anfang des 22. Jahrhunderts werden die organischen Brennstoffe nur noch 17 bis 18% des Energieaufkommens abdecken.
Die durch die Verbrennungsprozesse hervorgerufene CO_2-Anreicherung der Atmosphäre mindert die Durchlaßfähigkeit der Sonnenstrahlen nicht, hält aber die Wärmestrahlung der Erde zurück. Das führt zum sogenannten Treibhauseffekt. Mit Hilfe mathematischer Klimamodelle wurden folgende globalen Mindesttemperaturanstiege prognostiziert: 2030 1 °C, 2050 1,5 °C, 2100 2 °C, wobei der Anstieg in den höheren Breitengraden der Erde noch größer sein wird. Der Treibhauseffekt kann sich wegen der dadurch hervorgerufenen höheren Luftfeuchtigkeit weiter verstärken. Andererseits kann die stärkere Luftverschmutzung mit festen Teilchen zu einer größeren Reflexionsfähigkeit der Erdatmosphäre bezüglich der Sonnenstrahlen führen. Das würde den Treibhauseffekt mindern.
Wetterunbilden wie Gewitter, Hagel, Wirbelstürme und Tornados, die von Vulkanausbrüchen, Wald- und Ölbränden hervorgerufen werden, stellen das begrenzende Kriterium für Kern- und Wärmekraftwerkskomplexe mit deren hohen Abfallwärmeausstoß an die Gewässer und über die Kühltürme an die Atmosphäre dar. Unter diesem Gesichtspunkt werden Kernkraftwerkskomplexe schwerlich mehr als 40000 bis 50000 MW Leistung haben können.
Außerdem kann die Anreicherung der Atmosphäre mit dem schlecht auffangbaren radioaktiven Krypton-85 zu einer stärkeren Ionisierung der Luft und damit Verminderung ihrer Leitfähigkeit führen. Eine Folge wäre vermehrte Gewitterbildung bzw. erhöhte Niederschlagsmenge.
Außer den möglichen Folgen des Treibhauseffekts — Abtauen der Polkappen und Gletscher, Verändern der Schneemenge und Niederschläge, veränderte Luftzirkulation — und der dadurch hervorgerufenen Klimainstabilität würde eine globale Temperaturerhöhung um 1 °C zu einer Minderung des Ernteertrages um 1 bis 3% führen.

E. Broßmann, Berlin EA 2830

Besonderheiten bei der Errichtung von unterirdischen Magnetspeichern

Shebit, V. A.; Ter-Gasarjan, A. G.: Elektriceskie stancii (1987) 9, S. 67—69

Die supraleitenden elektromagnetischen Speicher werden von vielen Fachleuten als die perspektivreichsten Elektroenergiespeicher angesehen. Sie haben den höchsten Speicherwirkungsgrad mit 90% [im Vergleich dazu die üblichen Pumpspeicherwerke (PSW) mit maximal 75%] und sind in Bruchteilen von Sekunden leistungswirksam (PSW in der Größenordnung von Minuten), was insbesondere in Havariesituationen bedeutungsvoll ist.
Das Laden und insbesondere schnelle Entladen des Magneten ist mit der Entstehung riesiger auseinandertreibender und pressender Kräfte verbunden. Diese Kräfte sind problematisch, da eine Deformation der Spule selbst um einige Zentimeter zum Bersten führen kann.
Die Problematik der Haltekonstruktion hat entscheidende Bedeutung für die Zukunft der supraleitenden Magnetspeicher. Für einen Magneten mit einer Speicherkapazität von 10000 MWh (alle PSW der DDR etwa 8000 MWh) wäre eine Stahlbandage aus nichtrostendem Stahl von 700000 t erforderlich, was diesen Speicher sofort aus ökonomischen Gründen ausscheiden läßt. Die einzige ökonomisch annehmbare Lösung besteht in der Verlagerung der Magnetspulen in harte unterirdische Gesteinsschichten, die praktisch in größeren Tiefen überall vorhanden sind. Der streng kreisförmige Tunnel müßte für einen 1000- bis 10000-MWh-Einringspeicher im Querschnitt eine Breite von 5 bis 8 m, Höhe von 8 bis 20 m und einen Außenradius von 50 bis 120 m haben.
Aufgrund der dort entstehenden großen Drücke, hauptsächlich auf die Außenwand, wären mehrere übereinander angeordnete Tunnelringe um einen senkrechten Schacht eine günstigere Konstruktion. Für diese Variante ist schon ein Projekt mit zwölf Tunnelringen erstellt worden. Die kleineren Ringtunnel ermöglichen den Einsatz bewährter Vortriebstechnik und machen Sprengarbeiten überflüssig, die schwer einschätzbare Störungen (Risse) in der nicht völlig gleichmäßigen Gesteinsstruktur hervorrufen. Die hohe Präzision der Vertriebsarbeiten in den streng kreisförmigen Tunnel und die extremen Anforderungen an die Wasserisolation erfordern zumindest Verbesserungen der heutigen technischen Mittel.

E. Broßmann, Berlin EA 2695

BUCHER

Entwurf von adaptiven Systemen

Von *K.-P. Schulze; K.-J. Rehberg*. Berlin: VEB Verlag Technik 1988, 244 Seiten, 217 Bilder, Leinen, 33,— M.

Die gewachsenen Anforderungen an die Dynamik technischer Systeme und die heutigen Möglichkeiten digitaler Regler führen dazu, daß adaptive Regler zunehmend von praktischem Interesse sind. Aufgrund ihrer Struktur sind adaptive Systeme in der Lage, sich selbsttätig an veränderliche Betriebsbedingungen in der Weise anzupassen, daß ein vorgegebenes Gütemaß unabhängig von diesen Änderungen, ständig eingehalten wird. Damit können adaptive Systeme bevorzugt für die Lösung solcher Automatisierungsaufgaben eingesetzt werden, bei denen nur unvollständige Prozeßinformationen vorliegen.

Zur Zeit ist eine große Vielfalt unterschiedlicher Adaptionsmethoden bekannt, zu deren quantitativer Behandlung teilweise theoretisch sehr anspruchsvolle Ansätze notwendig sind. Die Autoren bemühen sich mit Erfolg um eine Systematisierung der Verfahren und um eine Beschreibung der grundsätzlichen Zusammenhänge in einer ingenieurgemäßen Darstellung. Dem dienen die zahlreichen mitgeteilten Programmabläufe für den Entwurf konkreter adaptiver Regler sowie die durchgerechneten Beispiele.

Obwohl adaptive Regler heute vorzugsweise digital realisiert werden, wird im Buch die kontinuierliche Beschreibungsform gewählt. Dadurch ergibt sich eine anschaulichere Darstellung, die bei kleinen Abtastzeiten des Reglers der Realität genügend gut angenähert ist. Natürlich wird bei Deadbeat-Reglern auch von der diskontinuierlichen Darstellung Gebrauch gemacht.

Nach grundlegenden Definitionen im Abschnitt 1 und einer Einführung in die Probleme der Analyse und Synthese im Abschnitt 2 werden im umfangreichen Abschnitt 3 adaptive Eingrößensysteme behandelt:

— Adaptivsysteme ohne Vergleichsmodell
— Systeme mit einem Modell der Regelstrecke zur Parameteridentifikation
— Systeme mit einem Vergleichsmodell des geschlossenen Kreises

werden ausführlich beschrieben. Neben dem Prinzip der gesteuerten Adaption werden Prinzipien mit geschlossenem Adaptivkreis dargestellt. Die theoretisch anspruchsvollen Entwurfsverfahren nach der direkten Methode von *Ljapunow* bzw. die Methode der Hyperstabilität werden erläutert und ihre Anwendung wird in einem Beispiel demonstriert.

In einem abschließenden Abschnitt über aktuelle Probleme und Entwicklungstendenzen wird ein Ausblick auf robuste adaptive Systeme und auf adaptive Mehrgrößensysteme, d.h. adaptive Zustandsregelungen gegeben.

Die Bedeutung des Buches von *Schulze* und *Rehberg* besteht darin, die Theorie adaptiver Systeme der breiten praktischen Anwendung einen Schritt näher gebracht zu haben. Es fördert die technische Weiterentwicklung und wird deshalb vor allem für Spezialisten in der Forschung und Entwicklung digitaler Regelungen sowie für die Aus- und Weiterbildung nützlich sein.

R. Schönfeld, Dresden EA 3998

WordPerfect 5.0

Von *H. Göckel*. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH 1989. 814 Seiten

Das Textbe- und -verarbeitungsprogramm WordPerfect bietet in seiner Version 5.0 einen Leistungsumfang, der dazu berechtigt, WordPerfect unter den professionellen Textsystemen eine Spitzenposition einzuräumen.

Die WordPerfect-Versionen 4.1 und 4.2 wurden beispielsweise um solche leistungsfähigen Komponenten wie die der problemlosen Integration „fremder" Grafiken, so z.B. aus AutoCAD, Windows Paint, Lotus 1-2-3 usw., und der automatischen Verwaltung und Aktualisierung von Textverweisen erweitert.

Rechtzeitig mit der Markteinführung von WordPerfect 5.0 erschien dieses Buch als sinnvolle Ergänzung zum WordPerfect-Handbuch. Es ist in der gewählten Darstellungsform sowohl als Lehrbuch für Anfänger als auch als Nachschlagewerk für fortgeschrittene Nutzer geeignet. Die mögliche Nutzung als „Buch neben den Computer" wird durch zusätzliche Tips und Tricks aus der Praxis des Verfassers unterstrichen. Hervorzuheben ist die übersichtliche Gliederung des mit der beschriebenen Software erstellten Buches sowie der Abbildung aller Menüs, so daß auch ein Erlernen des Systems ohne Computer denkbar ist. Wesentliche Hinweise werden im gesamten Buch markant herausgestellt.

Eine ausführliche Einführung in das System erhalten Anfänger im Kapitel 3, in dem sie syntaktisch klar und mit Darstellung der jeweiligen Tastenkombinationen und Menüs in die Grundfunktionen eingeführt und befähigt werden, einfache Dokumente selbständig anzufertigen. Die nachfolgenden Kapitel 4 bis 7 sind den Textbearbeitungs- und -gestaltungsoptionen, Blockfunktionen, Druckoptionen, Schriften, Zeilenformat und Seitenformat gewidmet. Dateiarbeit und das Mischen von Texten und Daten für Mail Merge sind Gegenstand der Kapitel 8 und 9. Wesentliche, die Leistungsfähigkeit eines Textprogrammes bestimmende Funktionen, wie das Erstellen von Inhaltsverzeichnissen, eines Index, von Listen und von Quellenverzeichnissen werden in den Abschnitten 10 bis 13 vorgestellt. Die mit dem System zur Verfügung gestellte Möglichkeit der Textdarstellung in Spaltenformat ähnlich der bekannten Darstellung in Tageszeitungen wird im Kapitel 14 beschrieben, bevor Ausführungen zum Rechnen sowie der Darstellung von mathematischen Formeln erfolgen. Von der Fuß- und Endnotenverarbeitung über Sortiermöglichkeiten bis hin zur verbesserten Macro-Verarbeitung der Version 5.0 erfolgen ausreichende Angaben, bis in den Kapiteln 21 und 22 das interne Lexikon und der Thesaurus beschrieben werden. Die Stärken von WordPereect 5.0 in bezug auf die Arbeit mit Grafiken einschließlich der problemlosen Übernahme „unterstützter" Grafikeditoren bis zur Konvertierung „fremder" Formate, womit letztlich die Grafiken mehrerer Dutzend Grafikprogramme nutzbar sind, bis hin zu den 30 im Lieferumfang enthaltenen „Logos", werden im Kapitel 24 aufgezeigt.

Nahezu 100 Seiten widmet der Verfasser alphabetisch geordneten WordPerfect-Funktionen, die entweder in den vorherigen Kapiteln nicht ausreichend behandelt wurden oder die kein eigenes Kapitel füllen.

In den Anhängen A und B werden die Installation mit Festplatten- und Diskettenoption, Druckerauswahl (etwa 300 fertige Druckertreiber) sowie Bildschirmauswahl (einschließlich automatisches Erkennen der Grafikkarte) und Konfiguration mit der Möglichkeit der Änderung aller möglichen Standardwerte einschließlich der von Maßeinheiten für Layoutgestaltung beschrieben.

Der Erläuterung der 4fachen Funktionstastenbelegung als Grundphilosophie der Interaktion mit dem Nutzer ist Anhang C gewidmet. Bevor eine ausgezeichnete Quickreferenz sowie Stichwortverzeichnis das Buch beenden, ist im Anhang E der Leistungsumfang von WordPerfect 5.0 im Netzwerkbetrieb beschrieben.

Insgesamt ist das Buch eine wertvolle Hilfe sowohl für den Anfänger, als auch für den „Profi". In seinem Bestreben, eine möglichst vollständige, mit Beispielen und Praxistips angereicherte Unterlage zur Beherrschung dieses komplexen Softwarepaketes zur Verfügung zu stellen, hat der Autor ein Werk vorgelegt, das mit seinen 814 Seiten doch unhandlich ist und auf so manchen PC-Laien abschreckend wirken dürfte. Es sei zu hoffen, daß das beschriebene leistungsfähige Softwareprodukt trotz seiner recht ungewöhnlichen (aber durchaus interessanten) Philosophie der Bedienführung durch eine Mehrfachbelegung der Funktionstasten eine weite Verbreitung findet.

U. Müller, Berlin EA 4025

Grundlagen und Anwendungen der CAD/CAM-Technologie

Eine Fachbiographie
Schriftenreihe der Betriebssektion der KDT und der Zentralen Informationsstelle Wissenschaft und Technik des VEB GRW „Wilhelm Pieck" Teltow, Heft 17, 1987
70 S., 490 Lit., Broschur 8,— M

Die rechnergestützte Konstruktion und Projektierung (CAD) sowie die rechnergestützte Fertigung (CAM) gewinnen zunehmend an entscheidender Bedeutung bei der Nutzung solcher Schlüsseltechnologien, wie Mikroelektronik, Sensortechnik, Mikrorechentechnik, flexible Automatisierung, Optoelektronik, Lasertechnik und Anwendung neuer Werkstoffe.

Entsprechend dieser Grundrichtung der wissenschaftlich-technischen Entwicklung sind dieser Fachbibliographie die neuesten Veröffentlichungen auf dem Gebiet der rechnergestützten Schlüsseltechnologien von CAD/CAM, CAE, CAQ bis hin zu CIM und vor allem der Entwicklung und Anwendung dieser rechnergestützten Technologien in den vielfältigsten industiellen Einsatzgebieten der Volkswirtschaft zugrunde gelegt. Zu diesen Einsatzgebieten

zählen insbesondere die chemische Industrie, die Energietechnik, der Maschinenbau, das Bauwesen, die Elektrotechnik/Elektronik und die Automatisierungstechnik.
Die Fachbibliographie enthält vorwiegend CAD/CAM-Anwendungsfälle, um den Entwicklern, Konstrukteuren und Technologen sowie den Kadern aller Leitungsebenen der Industrie sowie den in der Weiterbildung Tätigen Impulse für den Einsatz der CAD/CAM-Technologie zu vermitteln. Die Literaturhinweise beziehen sich in erster Linie auf die Fachliteratur des deutschsprachigen Raumes.
Die Fachbibliographie wird durch ein Sachwortverzeichnis vervollständigt, das auf die Ordnungsnummer des jeweiligen Literaturnachweises hinweist.
Mit dieser Publikation wird das derzeitig verfügbare Fachliteraturangebot erweitert.
Die Broschüre, die 490 Literaturnachweise enthält, die in begründeten Fällen mit einem Kurzreferat versehen sind, kann über die Herausgeber bezogen werden.

L. Blackert, Kleinmachnow EK 4036

Elektrotechnik in Gebäuden

Von *A. Kraner*. München: Pflaum Verlag 1989. 153 Seiten, 42 Bilder, 35 Tafeln

Dieser Band der Reihe Elektro-Praxis des Pflaum Verlages München setzt für den Bereich Vorbereitung und Planung elektrotechnischer Gebäudeausrüstungen neue wichtige Erkenntnisse um, die für eine folgerichtige und fachlich exakte Planung und Projektierung von elektrotechnischen Einrichtungen mit vorausgehender Bedarfsanalyse und abschließender wirtschaftlicher Bewertung notwendig sind.
Die Ausführungen des Buches wurden für Elektro- und Planungsingenieure zusammengestellt und vom Autor sind folgende Bereiche der elektrischen Gebäudeausrüstungen fachkundig beschrieben und dabei auch die einzuhaltenden Gesetze und Normen angegeben:

— notwendige Stromversorgungsanlagen für Gebäudeausrüstungen, unterteilt in Dimensionierung/Wahl und Schutz der Transformatoren, Netzersatzanlagen, Kabel sowie der Leistungsbeschreibungen und Zusammenstellung von Angeboten
— kombinierte Anlagen zur Notstrom-Wärme-Kraftkopplung sowie deren bauliche Anforderungen und einzuhaltende Umweltbedingungen
— wirtschaftliche Auswahl von Einzel- bzw. Gruppen-Blindleistungskompensationen und deren Leistungsberechnungen
— künstliche Beleuchtung von Innenräumen in Gebäuden in Unterteilung der Leuchtenauswahl, deren Auswahlkriterien unter Berücksichtigung rationeller Energieanwendung und Arten der arbeitsplatzorientierten Beleuchtungen sowie Grundsätze zur Anwendung neuer Installationstechniken
— rationelle Energieanwendung nach dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen unter Beachtung von veränderlichen Energiepreisen u.a. Kosten bzw. variabler Raumgestaltungen und des Rechnereinsatzes zur Optimierung der Steuerung der technologischen Gebäudeprozesse.

Darüber hinaus werden in dem als Anwendungsrichtlinie bzw. Musterprojekt aufgebauten Band ebenfalls typische praktische und wirtschaftliche Anwendungsbeispiele vollständig durchgerechnet, so daß den Fachleuten in der BRD ein wichtiges Rationalisierungsmittel in die Hand gegeben wird, um den rationellen Umgang mit Energien und die Gestaltung wirtschaftlicher Betriebsabläufe zu erreichen.

H. Kloust, Berlin EK 4029

Einführung in die digitale Signalverarbeitung

Von *H. Wupper*. Heidelberg: Hüthig Verlag 1989. 332 S., 154 Bilder, 8 Taf., Brosch.

Die digitale Signalverarbeitung findet immer stärker Eingang in Bereiche, die bislang Domänen der Analogtechnik waren; dazu kommen Gebiete, die überhaupt erst mit der digitalen Signalverarbeitung erschlossen werden können. Diese Entwicklung, ermöglicht durch die Fortschritte der Mikroelektronik, hält unvermindert an. Die in diese neuen Techniken einführende Literatur gewinnt für Studenten ebenso an Interesse wie für viele bereits im Beruf Stehende. Letzteres gilt nicht nur für Fachleute der Informationsverarbeitung, sondern auch für die mit Meßtechnik befaßten Spezialisten anderer Zweige der Elektrotechnik. Diesem Bedürfnis entspricht das vorliegende, im Rahmen der Reihe „ELTEX Studientexte Elektrotechnik" entstandene Buch.
Grundkenntnisse auf dem Gebiet der kontinuierlichen Signale und Systeme werden vorausgesetzt. Die dennoch hierzu im 1. Kapitel gegebene Zusammenfassung ermöglicht eine nützliche Wiederholung. Das 2. Kapitel enthält die Grundlagen zur Beschreibung zeitdiskreter Signale und Systeme. Hierbei wird u.a. in die z-Transformation und die diskrete Fouriertransformation (DFT) eingeführt. Die Kapitel 3 und 4 beschäftigen sich mit Strukturen und Approximationen digitaler Filter. Die hierbei vorausgesetzten Grundlagen der Dimensionierung analoger Filter sind im Anhang des Buches zusammengefaßt. Die schnelle Fourier-Transformation (FFT) wird im 5. Kapitel behandelt. Im Kapitel 6 wird ausführlich auf numerische Probleme eingegangen: Fragen, denen nicht immer die gebührende Aufmerksamkeit zuteil wird. Die Darstellung der digitalen Signalverarbeitung bedingt ein relativ hohes Mindestmaß an Mathematik, das der Autor aber mit ansprechendem Stil und unter Einbeziehung zahlreicher Beispiele zu guter Verständlichkeit geführt hat. Aufgaben am Ende jedes Kapitels mit Lösungsvorschlägen im Anhang unterstützen das Anliegen dieses Lehrwerkes, das auch für das Selbststudium empfohlen werden kann.

F. Fischer, Dresden EK 4034

Elektrische Antriebstechnik

Von *J. Vogel*. Berlin: VEB Verlag Technik 1988. 4., stark bearbeitete Auflage, 416 Seiten, 303 Bilder, 28 Tafeln, 25,50 M

Die bisherigen Auflagen des Buches erschienen unter dem Titel „Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik mit Berechnungsbeispielen". Der stürmischen Entwicklung von Mirko- und Leistungselektronik und deren Einfluß auf die Antriebstechnik veranlaßten den Autor und sein Kollektiv, dem Buch den oben angegebenen neuen Titel zu geben. Damit verbunden war eine inhaltliche Neuorientierung, die insbesondere in den Abschnitten, die sich mit der Stromrichtertechnik beschäftigen, zum Ausdruck kommt. In bewährter Form ist das schon seit vielen Jahren zum Standardwerk für Lehre und Praxis gewordene Buch in die folgenden Abschnitte eingeteilt:

— Analyse der Stell- und Bewegungsvorgänge
— Kennlinienfelder und Stellmöglichkeiten elektrischer Antriebsmaschinen
— Typenleistung und Schutzeinrichtungen elektrischer Maschinen
— Leistungselektronische Stellglieder für elektrische Antriebe
— Stromrichtergespeiste Gleichstrom- und Drehstromantriebe
— Elektrische Kleinmaschinen
— Anhang.

In ausgezeichnet dargestellter Form, durch Diagramme und vor allem Berechnungsbeispiele untermauert, wird der Stoff in der erforderlichen wissenschaftlichen Tiefe dargestellt. Damit ist Studierenden wie Praktikern ein gutes Handwerkszeug zur Einarbeitung in den Stoff, aber auch zur praktischen Anwendung gegeben. Von großem Wert ist, daß die modernen, durch Mikro- und Leistungselektronik bedingten Tendenzen, die sich in der Stromrichtertechnik und ihrer Ansteuerung und Regelung widerspiegeln, behandelt wurden. Es wird bewußt auf Fragen der Auslegung der Mikroelektronik verzichtet. Moderne mathematische Methoden zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens sowohl für Gleichstrom- als auch für Drehstrommaschinen werden verwendet. Bei der Darstellung der Frequenz-Spannungsgeregelten Asynchronmaschine fällt jedoch auf, daß die Frequenz-Spannungs-Zuordnung nur für den Leerlauffall, nicht aber für Lastfälle angegeben wurde.
Die moderne Literatur ist in einem ausreichenden Literaturverzeichnis angegeben und im Buch in sehr sinnvoller Art und Weise unter einheitlichen Gesichtspunkten verarbeitet und aufbereitet worden. Insgesamt sind 98 Berechnungsbeispiele angegeben, die ein tieferes Eindringen in den Stoff ermöglichen. Außerordentlich interessant sind die Abschnitte zur Ermittlung der thermischen Belastung bei Antriebssystemen, die auf dem vom Autor selbst entwickelten 2-Komponenten-Modell aufbauen, die klassischen Methoden über Ermittlung der Effektivwertleistung oder über ein Einkomponentenmodell sind ebenfalls angegeben.
Die textlichen Formulierungen, bildlichen Darstellungen, die Gleichungen und deren Heraushebungen machen das Buch zu einem sehr guten Handwerkszeug.
Das Buch ist für Studierende wie Praktiker als Studienmaterial ebenso wie als Nachschlagewerk zu empfehlen.

P.-K. Budig, Karl-Marx-Stadt EK 4061

Documentation

Kunze, W.; Kuß, H.; Binner, A.; Hahn, M.

Finite Elements Method — An Engineer's Modern Computing Tool

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12. pp. 444–449, 8 Figs., 27 Equations, 8 Refs.

For discretion and integral equation methods of the numeric field computation the application areas may be limited. The method of finite elements is appropriated especially, in nonlinear closed field areas with irregular structure. The efficiency of the FEM programme system XFEL of computing stationary and quasi-stationary magnet and temperature fields is represented, implemented in different hardware. One of the graphic processors for preprocessing, solution algorithms to certianly computing quasi-stationary fields and the evaluating strategy are dealt with.

Puchner, G.; Lindner, M.; Roseburg, D.

Numeric Magnet and Heat Field Computations in Great Transformers

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12. pp. 450–452, 5 Figs., 4 Tables, 17 Equations, 2 Refs.

Starting from the analogy between magnet and temperature field computation a method of stationary temperature field computation (2 D) by means of the method of the finite elements (MFE) is presented. The results, reached by that in computing a modeled great transformer, are represented graphically and compared with measuring values.

Zoworka, G.

Computing the Demand Coefficients in Industrial Factories

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, pp. 453–455, 1 Fig., 1 Table, 33 Equations, 4 Refs.

In this contribution a new statistical efficiency evaluating method is represented, by which the possibility of computing active and reactive powers for industrial consumers within a selected period is existing.

Franzke, H.; Geißler, E.; Krieger, D.

Partial Discharge Probe robotron M 4202 — Technical Properties and Application Hints

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, pp. 455–459, 10 Figs., 3 Tables, 7 Equations, 3 Refs.

The partial discharge probe robotron M 4202 (Lemke-probe) is increasingly used in the diagnosis, state analysis, and quality control of electric components and plants. Technical properties of the partial discharge probe are described, considerations about operating mode of the measuring method are made, and hints to the application are given.

Komeza, K.; Krusz, G.; Wiak, S.

Comparison of the Computation of a Great Transformer with the MFE with Elements of Zero-Order and of Higher Order

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, pp. 460–462, 5 Figs., 14 Equations, 6 Refs.

For computing the electromagnetic field of a transformer the method of the finite elements is used usually. It is the most propagated numeric approximation method of solving the boundary value problems. Results of the stray field computation in a transformer of 520 MVA are notified. Especially, the influence of the degree of the used Hermite's interpolation is analyzed.

Thiem, E.

Programme Packet FELD 88 of Computing Magnetic Fields with Effective Iteration Methods

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, pp. 462–464, 7 Figs., 1 Table, 3 Equations, 3 Refs.

The efficiency of the programme packet FELD 88 is represented. By using an effective iteration method by the method of the conjugate gradients a reduction of the computing time by 80 % and an increase of the number of grid points from 3000 to 12000 could be reached.

Rayes, M. N.; Böhme, H.

The High-Voltage Transmission System of Syria under the Influence of the Air Contamination

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, pp. 465–467, 8 Figs., 6 Refs.

Arcings in insulators of overhead transmission lines and in transformer stations resulted in Syria in break-downs of the energy supply. Therefore in 1983 intensive theoretical and practical investigations were beginning, to find out the more precise causes, to quantify the context with the air contamination and to give solutions. This contribution informs about state and knowledges of these investigations.

Bauer, H.; Gnüchtel, K.; Leucke, O.; Schindler, J.

Realization of Diagnosis Methods by Means of the Switching Plant Directing Techniques on Base of Microprocessors

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, pp. 467–472

The diagnostic method is an effective means of increasing the supplying reliability. It is concentrated to reducing the abundance of unexpected breakdowns of components of the main energy equipments or to reducing the breakdown time, e.g. the determination of the failure position distance. Each diagnostic part, which has to be integrated in the directing techniques, makes requirements to its components with regard to reliability, precision, clock synchronization, reaction time and storing deep. Before a network application for selected diagnostic functions the testing of the algorithms by means of a CAE-working station is recommended, as well as the testing of the components by means of a dynamic network model, and it is described by example of computing distances in conductors.

Kule, L.

Rectifier Comparison from the Point of View of the Energy Decrease

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, pp. 473, 1 Fig., 12 Equations

To betterly evaluating rectifiers the power factor λ is insufficient, which gives the information about the relative losses in unknown resistors of the supply mains. To reaching the actual losses for a better comparison of rectifiers using the relative loss factor $\varkappa$ is recommended for this reason.

Документация

Кунце, В.; Кусс, Х.; Биннер, А.; Хан, М.

Метод финитных элементов — современный инструмент вычисления инженера

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 444–449, 8 рис., 27 уравн., 8 лит.

Выделяются области применения для методов дискретизации и интегральных уравнений численного расчета поля. Метод финитных элементов оказывается особенно пригодным в случае нелинейных замкнутых областей поля с нерегулярной структурой. Представляется производительность системы программ XFEL по методу финитных элементов, реализованной на разных аппаратных средствах и предназначенной для расчета стационарных и квазистационарных магнитных и температурных полей. Рассматриваются вопросы по одному из графических процессоров для предварительной обработки, вопросы алгоритмов решения для надежного расчета квазистационарных полей, а также вопросы стратегии подытоживания.

Пухнер, Г.; Линднер, М.; Розебург, Д.

Численный расчет магнитных и температурных полей в мощных трансформаторах

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 450–452, 5 рис., 4 табл., 17 уравн., 2 лит.

Исходя из аналогии, существующей в расчете магнитных и температурных полей. приводится метод расчета стационарного температурного поля (2 D) по методу финитных элементов (МФЭ). Полученные при помощи его результаты расчета моделированного мощного трансформатора представляются в графическом виде и сравниваются с измеренными значениями.

Цоворка, Г.

Расчет коэффициентов потребления на промышленных предприятиях

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 453–455, 1 рис., 1 табл., 33 уравн., 4 лит.

В работе представляется новый способ определения потребляемой мощности, обеспечивающий возможность расчета активной и реактивной мощностей для промышленных потребителей электроэнергии в течении выбранного периода времени.

Францке, Х.; Гайсслер, Э.; Кригер, Д.

Зонд частичного разряда — технические свойства и указания по его применению

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 455–459, 10 рис., 3 табл., 7 уравн., 3 лит.

Зонд частичного разряда robotron M 4202 (зонд Лемке) в возрастающей мере находит применение в диагнозировании, анализе состояний и проверке качества электрических блоков и установок.

Дается списание технических свойств зонда частичного разряда, рассматривается принцип действия измерительного способа, даются указания по применению.

Комеца, К.; Крусс, Г.; Виак, С.

Сравнение расчета мощного трансформатора методом финитных элементов с элементами О и более высоких порядков

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 460–462, 5 рис., 14 уравн., 6 лит.

Для расчета электромагнитного поля трансформатора обычно применяют метод финитных элементов. Он представляет собой наиболее распространенный способ численного приближения для решения краевых задач. Сообщаются результаты расчета поля рассеяния в трансформаторе 520 МВА. Проанализируется предпочтительно влияние степени применяемой эрмитовой интерполяции.

Тим, Эльфи

Пакет программ FELD 88 для расчета магнитных полей при помощи высокопроизводительного итерационного метода

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 462–464, 7 рис., 1 табл., 3 уравн., 3 лит.

Представляется производительность пакета программ FELD 88. Благодаря применению высокоэффективного способа итерации по методу сопряженных градиентов удалось сократить время вычисления на 80 ** и повысить число точек сетки с 3000 на 12000.

Райес, М, Н.; Беме, Х.

Система высоковольтной передачи Сирии под влиянием загрязнения воздуха

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 465–467, 8 рис., 6 лит.

Пробои на изоляторах воздушных линий, а также в трансформаторных постанциях в Сирии привели к прерываниям электроснабжения. По данной причине в 1983 г. были начаты интенсивные теоретические и практические исследования с тем, чтобы выяснить точные причины, квантифицировать взаимосвязь с загрязнением воздуха и найти пути решения. Работа проинформирует о состоянии и полученных познаний данных исследований.

Бауэр, Х.; Гнюхтель, К.; Лойке, О.; Шиндлер, Й.

Реализация методов диагнозирования с помощью техники управления распределительными устройствами на базе микро ЭВМ

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 467–472,

Диагнозирование представляет собой действенное вспомогательное средство для повышения надежности снабжения. Оно направлено на уменьшение частотности неожиданных отказов компонентов основного энергетического оборудования или же на сокращение длительности отлазов, например, путем олпеделения расстояния до места отказа.

Любое средство диагнозирования, внедряемое в технику управления, предъявляет к ее компонентам определенные требования относительно надежности, точности, синхронизам такта, времени реакции и глубины запоминания. До применения их на сети рекомендуется проведение при помощи средств автоматизированного конструирования проверки алгоритмов для выбранных функций диагнозирования и испытание узлов на динамической модели сети, что описывается на примере расчета расстояния до места неисправности для проводов.

Куле, Л.

Сравнение выпрямителей с точки зрения потребления электроэнергии

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 12, стр. 473, 1 рис., 12 уравн.

Для лучшеи оценки выпрямителей. коэффициент мощности λ, информирующий об относительных потерях в неизвестных сопротивлениях подводящей линии, оказывается недостаточным.

Для учета действительных потерь в целях улучшенного сравнения выпрямителей поэтому рекоменкуется пользоваться относительным коэффициентом потерь $\varkappa$.

Kunze, W.; Kuß, H.; Binner, A.; Hahn, M.
Finite Elemente Methode – ein modernes Berechnungswerkzeug des Ingenieurs
ELEKTRIE, Berlin 43 1989) 12, S. 444-449, 8 Bilder, 27 Gln., 8 Lit.
Für die Diskretisierungs- und Integralgleichungsverfahren der numerischen Feldberechnung lassen sich die Anwendungsgebiete abgrenzen. Die Methode Finiter Elemente erweist sich als besonders geeignet bei nichtlinearen abgeschlossenen Feldgebieten mit unregelmäßiger Struktur. Vorgestellt wird die Leistungsfähigkeit des FEM Programmsystems XFEL, implementiert auf unterschiedlicher Hardware, zur Berechnung stationärer und quasistationärer Magnet- und Temperaturfelder. Auf einen der Grafikprozessoren für das Preprocessing, auf Lösungsalgorithmen zur sicheren Berechnung quasistationärer Felder und auf die Auswertungsstrategie wird eingegangen.

Puchner, G.; Lindner, M.; Roseburg, D.
Numerische Magnet- und Wärmefeldberechnungen in Großtransformatoren
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 450–452, 5 Bilder, 4 Tafeln, 17 Gln., 2 Lit.
Ausgehend von der Analogie zwischen Magnet- und Temperaturfeldberechnung wird eine Methode zur stationären Temperaturfeldberechnung (2D) nach der Methode der Finiten Elemente (MFE) angegeben. Die damit bei der Berechnung eines modellierten Großtransformators erzielten Ergebnisse werden grafisch dargestellt und mit Meßwerten verglichen.

Zoworka, G.
Berechnung der Bedarfskoeffizienten in Industriebetrieben
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 453–455, 1 Bild, 1 Tafel, 33 Gln., 4 Lit.
Im Beitrag wird ein neues statistisches Leistungsermittlungsverfahren vorgestellt, durch welches die Möglichkeit besteht, Wirk- und Blindleistungen für industrielle Elektroabnehmer in einem gewählten Zeitraum zu berechnen.

Franzke, H.; Geißler, E.; Krieger, D.
Teilentladungssonde robotron M 4202 – technische Eigenschaften und Anwendungshinweise
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 455–459, 10 Bilder, 3 Tafeln, 7 Gln., 3 Lit.
Die Teilentladungssonde robotron M 4202 (Lemke-Sonde) findet in zunehmendem Maße Anwendung bei der Diagnose, Zustandsanalyse und Qualitätskontrolle elektrischer Baugruppen und Anlagen.
Es werden technische Eigenschaften der Teilentladungssonde beschrieben, Betrachtungen zur Wirkungsweise des Meßverfahrens durchgeführt und Hinweise zur Anwendung gegeben.

Komeza, K.; Krusz, G.; Wiak, S.
Vergleich der Berechnung eines großen Transformators mit der MFE mit Elementen 0. und höherer Ordnung
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 460–462, 5 Bilder, 14 Gln., 6 Lit.
Für die Beerechnung des elektromagnetischen Feldes eines Transformators ist die Methode der Finiten Elemente üblich. Sie ist das verbreitetste numerische Näherungsverfahren zur Lösung der Randwertaufgaben. Es werden Resultate der Streufeldberechnung in einem 520-MVA-Transformator mitgeteilt. Vorzugsweise wird der Einfluß des Grades der benutzten Hermiteschen Interpolation analysiert.

Thiem, Elfi
Programmpaket FELD 88 zur Berechnung magnetischer Felder mit leistungsfähigem Iterationsverfahren
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 462–464, 7 Bilder, 1 Tafel, 3 Gln., 3 Lit.
Es wird die Leistungsfähigkeit des Programmpaketes FELD 88 vorgestellt. Durch Einsatz eines effektiven Iterationsverfahrens nach der Methode der Konjugierten Gradienten konnte eine Rechenzeitreduzierung um 80 % und eine Erhöhung der Gitterpunktanzahl von 3000 auf 12000 erreicht werden.

Rayes, M. N.; Böhme, H.
Das Hochspannungs-Übertragungssystem Syriens unter dem Einfluß der Luftverschmutzung
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 465–467, 8 Bilder, 6 Lit.
Überschläge an Freileitungsisolatoren und in Umspannwerken führten in Syrien zu Unterbrechungen der Energieversorgung. Deshalb begannen 1983 intensive theoretische und praktische Untersuchungen, um die genaueren Ursachen zu ergründen, den Zusammengang mit der Luftverschmutzung zu quantifizieren und Lösungen zu finden. Der Aufsatz informiert über Stand und Erkenntnisse dieser Untersuchungen.

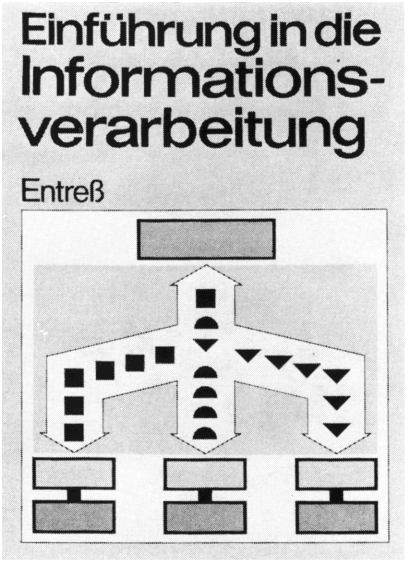
Bauer, H.; Gnüchtel, K.; Leucke, O., Schindler, J.
Realisierung von Diagnosemethoden mit Hilfe der Schaltanlagenleittechnik auf Mikrorechnerbasis
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 467–472
Die Diagnostik ist ein wirksames Hilfsmittel zur Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit. Sie zielt auf eine Reduzierung der Häufigkeit für unerwartete Ausfälle von Komponenten der Energiehauptausrüstungen oder auf eine Verringerung der Ausfalldauer, z. B. der Bestimmung der Fehlerortentfernung.
Jedes in die Leittechnik zu integrierende Diagnosemittel stellt an deren Komponenten Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Taktsynchronität, Reaktionszeit und Speichertiefe. Vor einem Netzeinsatz wird für ausgewählte Diagnosefunktionen die Prüfung der Algorithmen mit Hilfe eines CAE-Arbeitsplatzes und die Baugruppenprüfung an einem Dynamischen Netzmodell empfohlen und am Beispiel der Fehlerentfernungsberechnung bei Leitungen beschrieben.

Kule, L.
Gleichrichtervergleich vom Standpunkt der Energieabnahme
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 12, S. 473, 1 Bild, 12 Gln.
Für die bessere Bewertung von Gleichrichtern erweist sich der Leistungsfaktor 2, der die Information über die relativen Verluste in unbekannten Widerständen der Zuleitung gibt, als unzureichend.
Um die tatsächlichen Verluste für einen besseren Vergleich von Gleichrichtern zu erreichen, wird daher empfohlen, den relativen Verlustfaktor κ zu benutzen.

ELEKTRIE

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik Oranienburger Str. 13/14, Berlin, DDR, 1020 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345) Ing. *Günther Barth*, Redakteur (Telefon 2870343)
Gestaltung	*Ursula Maria Lange*
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, Bereich Borsdorf Borsdorf, 7122
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, Berlin, 1020 PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 8 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR, 1157
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ústřédni Expedie a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 120000 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače Praha, Posta 022, 88547 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzéće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes. O'Reilly No., 407, Ciudad Habana
VR Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scintelii, Bucuresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Republik Ungarn	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Hà Nôi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Leipzig, DDR, 7010, Postfach 160; und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR, 7010

Im Fachbuchhandel erhältlich



Einführung in die Informationsverarbeitung

Von Prof. Dr. sc. techn. Gerhard Entreß und Doz. Dr. sc. techn. Lieselotte Entreß. 2., bearbeitete Auflage. 312 Seiten, 341 Bilder, 108 Tafeln, Leinen, 23,50 M; 36,— DM.
Bestellangaben: 553 920 2/Entreß, Information

Dieses Buch vermittelt die technischen Grundlagen der Informationsverarbeitung. Behandelt werden Grundbegriffe und Wirkprinzipien der Technik der Informationsverarbeitung sowie Datenträger, Speicher, Prozessoren, Rechner, Datenübertragung, Rechnersysteme, Peripherie, Architekturen, Bauelemente und Betriebssicherheit. Zahlreiche Beispiele runden die Thematik ab. Übungsaufgaben und Lösungen vertiefen den Stoff. In der 2. Auflage wurden Ergänzungen, Präzisierungen und Hinweise auf den neuesten Stand der Technik vorgenommen.

Von der einfachen Logikschaltung zum Mikrorechner

Von Dr.-Ing. Joachim Matschke. 4., durchgesehene Auflage. 232 Seiten, 216 Bilder, 86 Tafeln, Leinen, 20,— M; 30,— DM.
Bestellangaben: 554 017 4/Matschke, Mikrorechner

Das Buch für alle diejenigen, die sich möglichst rasch in die Grundlagen digitaler Mikroelektronik, vor allem moderner Mikrorechner einarbeiten wollen.

Explosionsgeschützte elektrotechnische Betriebsmittel

Von einem Autorenkollektiv unter Leitung von Dr.-Ing. Hans-Jürgen Linström. 1. Auflage. 95 Seiten, 40 Bilder, 7 Tafeln, Broschur, 10,— M; 16,— DM.
Bestellangaben: 553 891 2/Linström, Betriebmittel

Ausgehend von den Bedingungen für das Entstehen von Explosionen und den dabei auftretenden Erscheinungen werden die Möglichkeiten des Explosionsschutzes bei elektrotechnischen Betriebsmitteln gezeigt und den in bestimmten Industriebereichen vorhandenen Gefährdungsgraden gegenübergestellt. Darüber hinaus werden konkrete, auf die einzelnen Schutzarten bezogene Hinweise zur Wartung und Reparatur explosionsgeschützter elektrotechnischer Betriebsmittel gegeben.

VEM-Handbuch Prozeßsteuerungstechnik

Von einem Autorenkollektiv unter Leitung von Dr.-Ing. Kurt Grubba. Herausgegeben vom Zentrum für Forschung und Technologie des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin. 2., durchgesehene Auflage. 312 Seiten, 164 Bilder, 72 Tafeln, Kunstleder, 32,— M; 42,— DM.
Bestellangaben: 553 886 7/VEM-Handb. Prozeßsteuerung

Es werden verbindungsprogrammierte und speicherprogrammierbare binäre Steuerungen zur Automatisierung technologischer Prozesse behandelt. Nach einer knappen Darstellung von Grundlagen der Steuerungstechnik wird die gerätetechnische Basis erläutert. Ausführungen zur Systemtechnik, zum Aufbau, zur Entwurfsmethodik und technischen Realisierung bilden den Hauptteil.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

ISSN 0013—5399
ELEKTRIE · Berlin 43 (1989) 12 · S. 441—480

6730 12 177 027 405
KOMB KERAM WERKE
8012 7001 0150 PF 1

Neuerscheinung · Kürzlich ausgeliefert

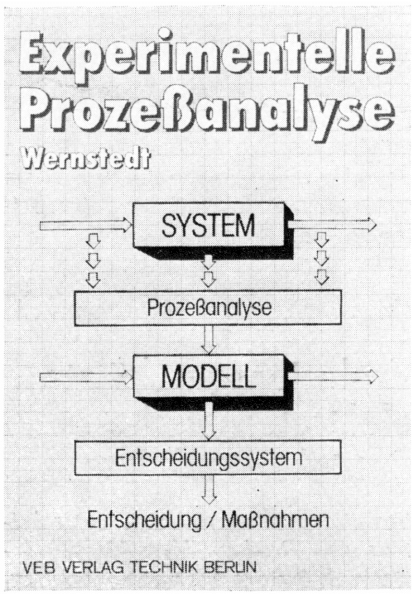
Experimentelle Prozeßanalyse

Die mathematische Abbildung des Verhaltens von Signalen und Systemen in Modellen ist eine der wesentlichsten Strategien zum Erkennen von Wirkungsmechanismen und zur rechnergestützten Lösung von Entwurfs-, Diagnose-, Überwachungs-, Steuerungs-, Vorhersage- und Planungsaufgaben in technischen und nichttechnischen Prozessen. Zur Bildung von Modellen haben die Methoden der experimentellen Prozeßanalyse, die auf gemessenen Daten aufbauen, eine sehr breite Anwendung gefunden.

Auf der Basis einer einheitlichen Darstellung von Modellen und Verfahren werden Grundlagen zur Beschreibung des statischen und dynamischen Verhaltens von Signalen in Signalmodellen sowie ausgewählte Verfahren zur Signalaufbereitung vorgestellt.

Wesentliche Schätzverfahren zur Bildung von Systemmodellen werden bei der Beschreibung des statischen Eingangs-/Ausgangsverhaltens untersucht und allgemeingültige Aussagen abgeleitet. Weiterhin werden Probleme der Echtzeitmodellbildung und der optimalen Versuchsplanung behandelt.

Zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens in ungestörten Systemen werden einfache robuste Verfahren im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Zustandsermittlung mittels Beobachter dargelegt. Für gestörte Systeme wird auf die Ermittlung von



Von Prof. Dr. sc. techn. Jürgen Wernstedt
392 Seiten, 242 Bilder, 139 Tafeln, Leinen, 40,—M; 50,—DM.
Bestellangaben: 554 069 2/Wernstedt, Prozeßanalyse

Im Fachbuchhandel erhältlich

Modellen in Form von Volterra-Reihen- und von Differenzengleichungen eingegangen. Für Zustandsmodelle werden spezielle Filterverfahren (Kalman-Bucy-Filter) hergeleitet. Ausgewählte Probleme der Anwendung von Schätzverfahren zur Bildung dynamischer Systemmodelle (Entwurf optimaler Testsignalfolgen, Schätzung in geschlossenen Ketten, Strukturprüfungsverfahren, Wahl der Tastperiode) ergänzen die grundsätzlichen Betrachtungen.

Der dargelegte Stoff ist in jedem Abschnitt durch Übungsaufgaben und Demonstrationsbeispiele ergänzt und illustriert.

Sowohl Absolventen als auch Studenten der Ingenieurwissenschaften, aber auch Naturwissenschaftlern, Medizinern, Landwirten und Ökonomen werden in diesem Buch die Grundlagen vermittelt, die zur rechnergestützten Ermittlung von Signal- und Systemmodellen aus gemessenen Daten erforderlich sind.

Übersicht der Hauptabschnitte

Einführung · Beschreibung des Amplitudenverhaltens von Signalen · Beschreibung des dynamischen Verhaltens von Signalen · Bestimmung des dynamischen Verhaltens ungestörter Systeme · Bestimmung des statischen Verhaltens von gestörten Systemen · Bestimmung des dynamischen Verhaltens gestörter Systeme · Lösung der Übungsaufgaben.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN